

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geotechnologie



Kateřina Bočková

Vliv obsahu jílové frakce na reziduální pevnost zemin

Influence of clay fraction on residual strength of soils

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Boháč, CSc.

Praha, 2018

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 21.05.2018

Kateřina Bočková

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat všem, kdo mi byli při psaní mé práce a provádění laboratorních zkoušek nápomocni. V první řadě mému školiteli Ing. Janu Boháčovi, CSc. za odborné vedení a konzultace během tvorby práce, a především za jeho trpělivost. RNDr. Janu Najserovi, Ph.D. velice děkuji za cenné rady k obsluze používaného smykového přístroje.

Dále bych velmi ráda poděkovala RNDr. Davidu Hradilovi, Ph.D. za odborné konzultace v oblasti jílové mineralogie a za provedení rentgenové difrakce.

Mé velké díky patří také doktorským studentům inženýrské geologie PřF UK, jmenovitě především Mgr. Jakubu Roháčovi a Mgr. Tomáši Mohylovi za pomoc s laboratorními zkouškami.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem obsahu jílové frakce na hodnotu reziduálního úhlu vnitřního tření zemin. V úvodní části je nastíněna problematika reziduální pevnosti v mechanice zemin. Stěžejní část sumarizuje několik publikovaných prací, které se vlivem obsahu jílové frakce na reziduální pevnost zabývaly, a přináší jejich celkové zhodnocení. Poznatky z rešeršní části práce jsou dále aplikovány na postupy provedených vlastních provedených laboratorních zkoušek. Série rotačních smykových zkoušek jílové frakce vzorku z lokality Dobkovičky, křemenného písku (Střeleč) a jejich směsí poskytla data s podobným trendem poklesu pevnosti s nárůstem obsahu jílové frakce jako uvedené publikace. Ze studovaných podkladů i z laboratorních zkoušek vyplývá, že korelace reziduální pevnosti s obsahem jílové frakce je bez znalosti mineralogického složení zeminy nedostatečná a nejvhodnějším způsobem jejího stanovení je provedení rotační smykové zkoušky.

Abstract

This bachelor thesis studies the influence of clay fraction on the residual strength of soils. The introductory part of the thesis outlines the topic of residual strength in soil mechanics. The main part contains a review of research papers that studied the influence of clay fraction on the residual strength of soils. The information from the review is summarized and used in the design of laboratory experiments. A series of ring shear tests were conducted on (i) clay fraction from the “Dobkovičky” area, (ii) sand from the Střeleč quarry and (iii) their mixtures. The experimental results correspond with the reviewed papers: the correlation between the residual strength and the content of the clay fraction is, without the knowledge of mineralogical composition, insufficient. Therefore, the ring shear test is the most reliable method of determining the residual strength.

Obsah

1. Úvod	7
2. Reziduální pevnost.....	8
2.1 Historie výzkumu reziduální pevnosti	10
2.2 Využití reziduální pevnosti	11
2.3 Způsob stanovení	12
2.3.1 Translační smyková krabice	13
2.3.2 Rotační přístroje.....	14
3. Vliv obsahu jílové frakce na reziduální pevnost	18
3.1 Historie korelace reziduální pevnosti s obsahem jílové frakce	18
3.1.1 Skempton (1964)	18
3.1.2 Kenney (1967)	19
3.1.3 Lupini, Skinner & Vaughan (1981)	22
3.1.4 Skempton (1985)	25
3.1.5 Mesri & Cepeda-Diaz (1986)	26
3.1.6 Tiwari & Marui (2005)	27
3.1.7 Shrnutí.....	28
3.2 Vliv dalších parametrů na reziduální pevnost.....	28
4. Provedené zkoušky	29
4.1. Popis vzorku.....	29
4.2 Popis použitého přístroje.....	32
4.3 Metodika zkoušek	33
4.3.1 Separace jílu.....	33
4.3.2 Příprava směsí.....	36
4.3.3 Kalibrace dynamometrů.....	36
4.3.4 Smykové zkoušky	36
4.4 Vyhodnocení	39
4.5 Výsledky	39
4.6 Diskuse.....	48
5. Závěr	50
6. Literatura	52

1. Úvod

V problematice stability svahu je jedním z nejzásadnějších parametrů pevnost. Pevnost je definována jako maximální smykové napětí, které je materiál v daném stavu schopen přenést. V mechanice zemin rozlišujeme tři druhy pevnosti, vrcholovou, kritickou a reziduální. Reziduální pevnosti, které se tato práce věnuje, může dosáhnout pouze zemina s dostatečným množstvím plochých, především jílových částic. Toto množství s různou přesností odráží obsah jílové frakce. K dosažení reziduální pevnosti dojde po dostatečně dlouhém posunu, díky uspořádání plochých částic paralelně se směrem působení smykových sil. K posunům potřebných velikostí dochází v místech svahových pohybů a na pláštích zarážených pilot.

Reziduální pevnost lze stanovovat laboratorními smykovými zkouškami v translační či rotační smykové krabici. Vhodnější je použití rotační smykové krabice, neboť ta umožňuje provedení neomezeně dlouhého nepřerušovaného smyku.

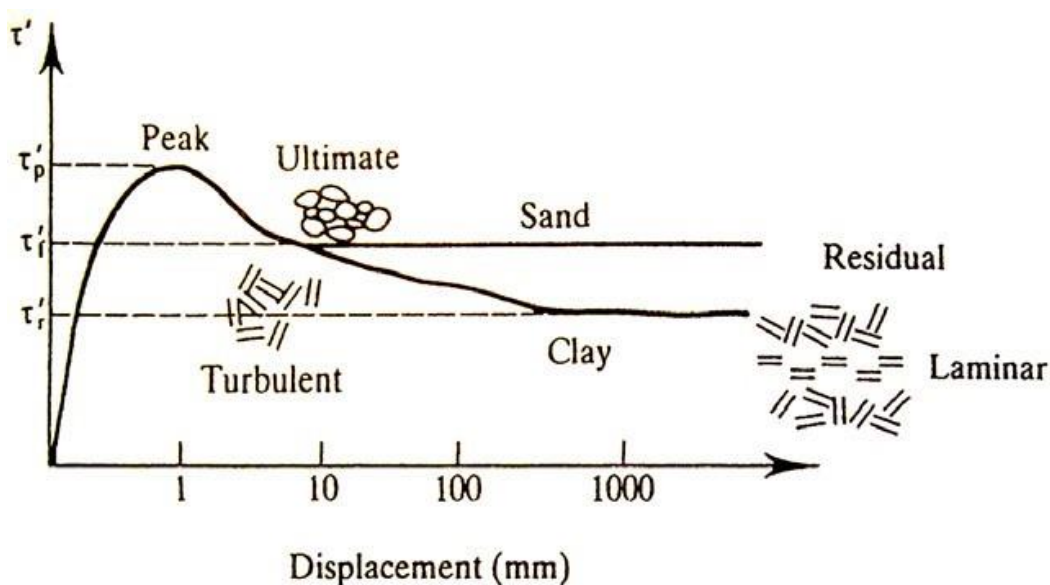
Výzkum reziduální pevnosti započali již ve 30. letech 20. století Hvorslev (1936, 1937, 1939), Tiedemann (1937) a Haefeli (1938). Za její uvedení do praxe pak můžeme vděčit především Skemptonovi (1964). Výzkumu reziduální pevnosti se během let věnovala celá řada dalších autorů, jejichž poznatky objasnily velkou část této problematiky.

Cíle práce

Hlavním cílem této práce je odhalení vztahu mezi reziduální pevností a obsahem jílové frakce. Dílčí cíle, které umožní naplnění cíle hlavního, jsou dva. V první řadě jde o zjištění, kdo se tomuto tématu doposud věnoval a k jakým dospěl závěrům. Tohoto cíle dosáhnou uvedením několika příkladů, k tomuto účelu nejvhodnějších. V druhé řadě ověřím správnost zjištěných informací pomocí vlastních laboratorních zkoušek, pro něž zvolím postupy maximálně odpovídající postupům uvedených autorů.

2. Reziduální pevnost

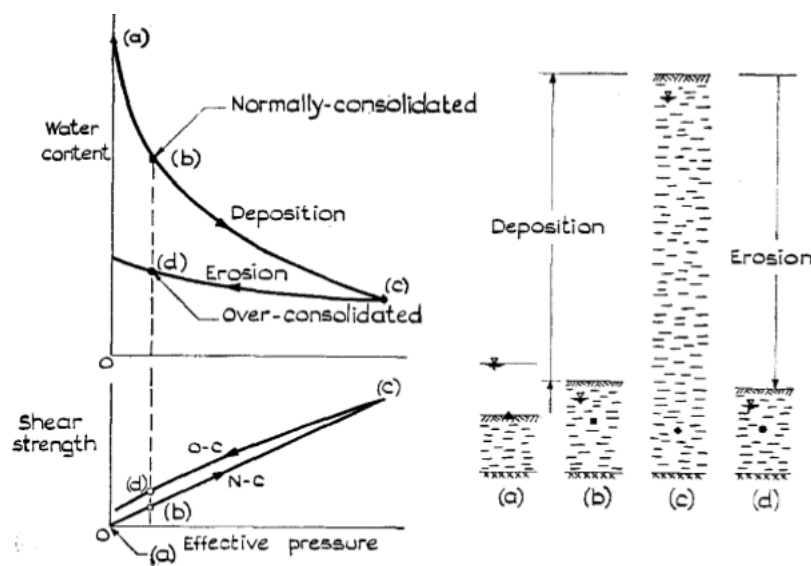
Pevnost je maximální smykové napětí, které je materiál v daném stavu schopen přenést. Jakmile zatížení překročí toto maximální napětí, dojde k porušení materiálu (Atkinson, 2007). Pokud se porušení (obálka pevnosti) v rovině normálové vs. smykové napětí aproximuje přímkou, jsou parametry pevnosti úhel vnitřního tření ϕ' a soudržnost c' . Podle stavu, ve kterém se zemina nachází, rozlišujeme v mechanice zemin tři základní druhy pevnosti, vrcholovou (*peak*), kritickou (*critical, ultimate*, někteří autoři užívali také *fully softened*) a reziduální (*residual*). Jejich znázornění je na Obr. 2.1. V tomto případě se stav odvíjí především od velikosti posunu, kterým byla zemina postižena, a v jehož důsledku došlo k uspořádání zrn.



Obr. 2.1: Reziduální pevnost jílů při velmi velkých posunech (Atkinson, 2007).

Parametry vrcholové pevnosti nejsou konstantami, závisejí na stavových proměnných, tedy číslu pórovitosti e a normálovém efektivním napětí σ' . Vrcholová pevnost vzniká překonsolidací zeminy, naznačenou na Obr. 2.2. Bod (a) představuje právě vznikající sediment. S postupným ukládáním materiálu se zvyšuje efektivní napětí a snižuje obsah vody (b). Sediment je normálně konsolidovaný, neboť ve své minulosti nebyl podroben většímu napětí, než kterému je vystavován v danou chvíli. Největší množství uloženého materiálu, a tedy i největší působící napětí za předpokladu nasycení, reprezentuje bod (c). Pokud dojde ke snížení mocnosti sedimentu následkem eroze, sníží se efektivní napětí a obsah vody opět vzroste (d). Vzrůst je ale výrazně nižší, než byl pokles způsobený

konsolidací. Zrna jsou zaklíněna a smyková pevnost je oproti normálně konsolidované zemině vyšší (zemina je překonsolidovaná).



Obr. 2.2: Normálně konsolidovaný a překonsolidovaný jíl (Skempton, 1964).

Oproti tomu kritická pevnost je skutečným materiálovým parametrem (konstantou). Její velikost určuje mineralogie zrn. Kritické pevnosti dosáhne za dostatečně dlouhého smyku každá zemina, bez ohledu na to, jestli je normálně konsolidovaná, či překonsolidovaná. Je doprovázena takzvaným turbulentním uspořádáním částic, při kterém se jednotlivá zrna přes sebe převalují a nemají žádnou přednostní orientaci. Je nejnižší, a tedy i konečnou pevností pro zeminy hrubozrnné a jemnozrnné s trojrozměrnými zrny.

Pro jemnozrnné zeminy s vyšším obsahem plochých (jílovitých) částic je konečnou pevností reziduální pevnost. Reziduální pevnost je nejnižší pevnost, které může zemina při velkých posunech po smykové ploše dosáhnout. Je vždy drénovaná (odvodněná), pro písky a všeobecně zeminy s trojrozměrnými zrny neexistuje. Avšak u jílu může činit i pouhých 50 % velikosti kritické pevnosti (Atkinson, 2007). Minimální potřebná velikost posunu se pohybuje řádově od 1 až 2 metrů (Skempton, 1977). Během tohoto posunu se plochá jílová zrna v zemině uspořádají souběžně se smykovou plochou. Dochází k takzvanému kluznému (laminárnímu) smykovému chování, kdy pevnost závisí na velikosti odporu vůči vzájemnému tření ploch jednotlivých jílových částic. Reziduální pevnost je tedy, stejně jako kritická pevnost, závislá na mineralogii zeminy. Její velikost se také odvíjí od chemického složení pórové vody. Geologická historie na ni nemá vliv, neboť ta byla eliminována již při dosažení kritické pevnosti za značně nižších posunů. Hovoříme proto o dalším materiálovém parametru (konstantě) zeminy.

2.1 Historie výzkumu reziduální pevnosti

Počátky výzkumu reziduální pevnosti sahají již do druhé poloviny 30. let 20. století. Lupini et al. (1981), z jejichž článku je tento odstavec převzatý, uvádí, že autory prvních měření pevnosti zemin na velkých smykových deformacích byli Hvorslev (1936, 1939), Tiedemann (1937), Haefeli (1938) - všichni v Lupini et al. (1981) a Hvorslev (1937). Tiedeman zjistil, že při velkých smykových posunech získá zemina konstantní pevnost, kterou nazval *čistě kluzným odporem* (*pure sliding resistance*). Haefeli nazval konečný bod pracovního diagramu *zbytkovou smykovou pevností* (*remaining shear strength*). Hvorslev se při své práci věnoval i vývoji a porovnání přístrojů vhodných k určení reziduální pevnosti a rotační smykový krabicový přístroj označil za nejvhodnější.

Od té doby vzniklo několik prací, které se reziduální pevností zabývaly. Jejich stručný přehled (až do roku 1980) uvádí například Lupini (1981) ve své doktorské práci. Na důležitost jejího využití v praxi upozornil Skempton (1964). Ve své Rankinově přednášce uvedl několik případů sesuvů v zářezech londýnského jílu. Jednalo se o oblasti, již dříve svahovými pohyby porušené, ve kterých došlo k mobilizaci reziduální pevnosti. Poukázal tím na význam respektování poklesu na hodnotu reziduální pevnosti při stabilitních analýzách v takovýchto podmínkách.

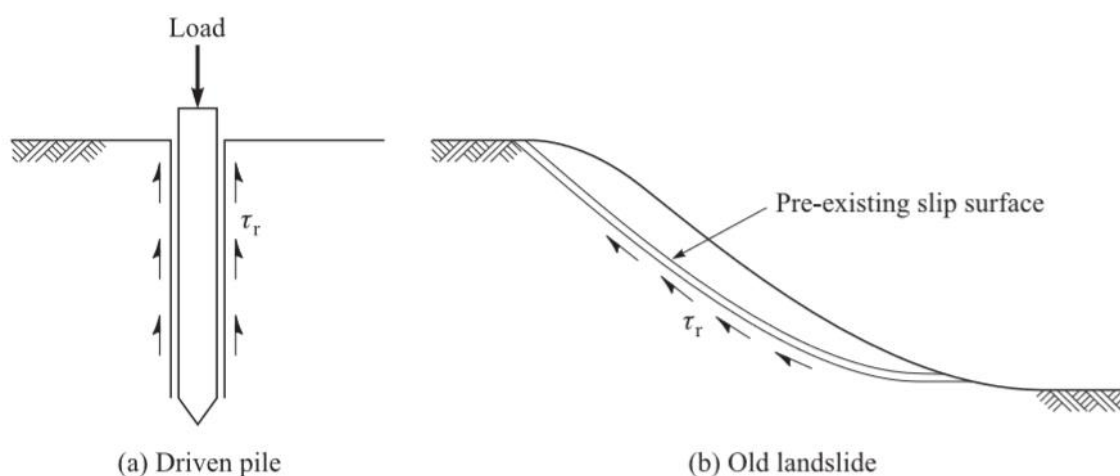
Z reziduální pevnosti se postupem času stal všeobecně uznávaný, v praxi užívaný parametr. Byla provedena řada výzkumů, věnující se faktorům, jimiž je ovlivňován a jež ovlivňuje. Část z nich Skempton (1985), dvacet let od své původní práce, shrnul.

Během dalších třiceti let se zkoumáním reziduální pevnosti zabývala řada autorů. Mesri & Cepeda-Diaz (1986) se věnovali jílu a břidlicím, jejich mineralogii a korelacím jejich úhlů vnitřního tření v reziduálním stavu s vlhkostí na mezi tekutosti, s množstvím jílové frakce a s úhlem vnitřního tření v kritickém stavu. Stark & Eid (1994) se zabývali reziduální pevností měřenou v rotačním smykovém přístroji. Sledovali její závislost na typu a množství jílových minerálů. Pozorovali pokles reziduální pevnosti s rostoucí vlhkostí na mezi tekutosti a zvyšujícím se obsahem jílové frakce a nelinearitu reziduální obálky pevnosti při obsahu jílové frakce nad 50 % a vlhkosti na mezi tekutosti v rozmezí 60 až 220 %. V Bromheadově (2005) monografii o stabilitě svahů je reziduální pevnost významnou součástí. Tiwari & Marui (2005) navrhli metodu korelace reziduální smykové pevnosti s mineralogickým složením, založenou na výsledcích zkoušek na více než 35 směsích smektitu, kaolinitu a křemene v různých zastoupeních. Xu et al. (2018) experimentálně

studovali reziduální pevnost jílových zemin a vyvodili následující závěry: rychlost smyku a velikost překonsolidace mají na reziduální pevnost zanedbatelný vliv; reziduální pevnost klesá se vzrůstajícím indexem plasticity; při aplikaci nízkých nebo naopak vysokých hodnot normálového napětí je reziduální pevnost výrazně nelineární.

2.2 Využití reziduální pevnosti

K mobilizaci reziduální pevnosti dochází pouze v jemnozrnných zeminách s vysokým obsahem plochých, laminárně uspořádaných částic. Aby k uspořádání došlo, je třeba velkých posunů. Ty můžeme sledovat v případech znázorněných na Obr. 2.3. Obr. 2.3(a) představuje mobilizaci reziduální pevnosti na plášti zarážené piloty. Při zarážení dochází na kontaktu pláště piloty se zeminou ke značným posunům, které nutí zrna v bezprostředním okolí k paralelnímu uspořádání s pilotou. Při výpočtech tření na plášti zarážené piloty je tedy nutné použít reziduální pevnost. Druhým případem je Obr. 2.3(b), kde je reziduální pevnost mobilizována v místě svahového pohybu. Posuny po smykové ploše způsobují uspořádání částic rovnoběžně se směrem působení smykových sil. Při výpočtu stability svahu je proto třeba použít reziduální pevnost.

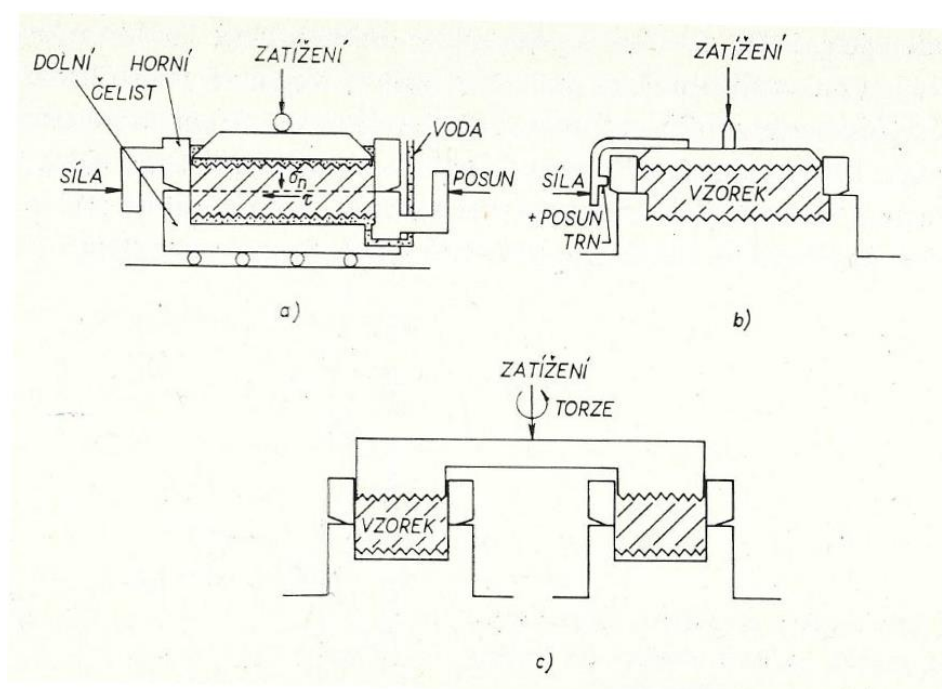


Obr. 2.3: Případy, u kterých je rozhodující smykovou pevností reziduální pevnost (Atkinson, 2007); (a) Zarážená pilota, (b) Sesuv, při němž došlo k dostatečně dlouhému smykovému pohybu.

2.3 Způsob stanovení

Nejvhodnějším způsobem stanovení reziduální pevnosti jsou laboratorní smykové zkoušky typu *direct shear*. Princip těchto zkoušek spočívá v přímém měření velikosti smykového napětí. Patří mezi ně zkoušky založené na principu prostého smyku (*simple shear*) a zkoušky v translačních a rotačních smykových krabicích. Schématické znázornění vertikálních řezů těmito krabicemi je na Obr. 2.4. Další možností stanovení reziduální pevnosti je smyk v trojosém přístroji. U tohoto typu zkoušky se velikost smykového napětí dopočítává z velikostí hlavních napětí. Možnost použití trojosého přístroje je však velice omezená. Vyžaduje vzorek s předem připravenou smykovou plochou a korekce na změnu průřezu vzorku a na vliv membrány na měřené napětí (Chandler, 1966).

K určení reziduální pevnosti je, spíše než translační smyková krabice, vhodná rotační smyková krabice, která je konstruována právě za tímto účelem. Umožňuje nepřerušované provedení neomezeně dlouhého smyku a zajišťuje stálou velikost smykové plochy. V běžné praxi se však často reziduální pevnost stanovuje v translační smykové krabici.



Obr. 2.4: Schéma řezu některými krabicovými smykovými přístroji (Feda, 1977).

2.3.1 Translační smyková krabice

Zkoušky v translační smykové krabici se provádějí na neporušených či rekonstituovaných vzorcích. Vzorek se umísťuje do vzorkového prostoru, který je v horizontálním řezu kruhového nebo čtvercového tvaru. Krabice je horizontálně rozdělena na dvě poloviny. Jedna polovina je pevně ukotvena pomocí třmenu. Třmen je spojen se siloměrem, měřícím velikost smykové síly. Druhá polovina krabice se konstantní rychlostí pohybuje ve směru osy třmenu a tím vyvozuje smyk. Na vzorek je svisle aplikováno normálové napětí, zpravidla pomocí pákového mechanismu. V průběhu zkoušky je měřena změna výšky vzorku a horizontální posun. Na horní i dolní podstavě vzorku je umožněna drenáž.

Stanovit reziduální pevnost v translační smykové krabici lze dvěma způsoby. Prvním způsobem je překládání pohyblivého dílu krabice. Po dosažení maximálního posunu se pohyblivá polovina krabice umístí zpět do počáteční polohy. Tento postup se opakuje do dosažení konstantní hodnoty smykového napětí. Jeho nevýhodou je nevyhnutelné ovlivnění zkoušky manipulací se vzorkem. Druhou možností je dvousměrný smyk. Po dosažení maximálního posunu se obrátí směr smyku. Toto se opakuje do ustálení velikosti smykové pevnosti. Při tomto postupu však dochází změnou směru pohybu k reorientaci jílových zrn. K dosažení reziduální pevnosti je proto potřeba provést větší množství cyklů.

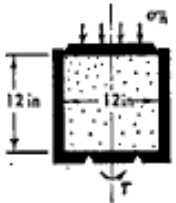
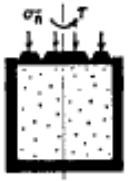
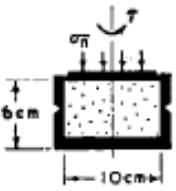
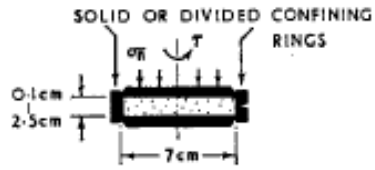
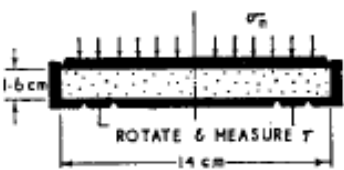

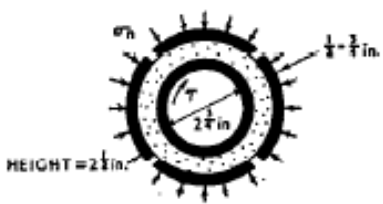
Nevýhodou zkoušek reziduální pevnosti v translační smykové krabici je zmenšující se smyková plocha se zvětšujícím se posunem a možnost ovlivnění zkoušky manipulací s pohyblivou částí krabice.

2.3.2 Rotační přístroje

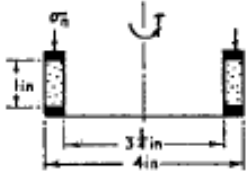
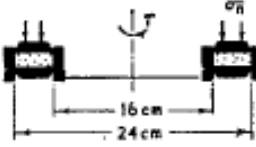
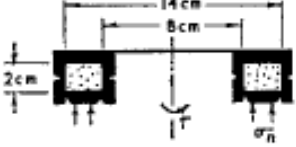
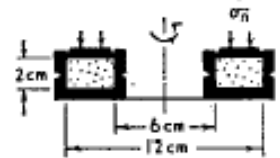
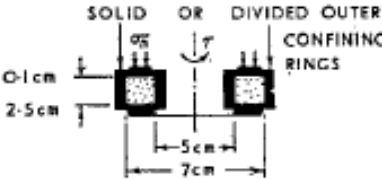
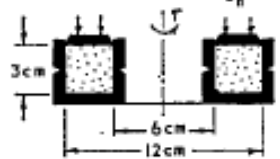
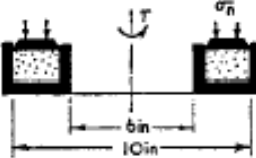
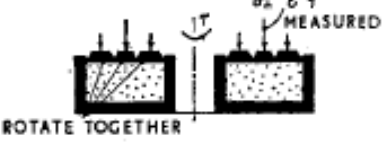
Rotační smyková krabice je přístroj, jehož vzorkový prostor je v různých variantách válcového tvaru. Může být vysoký a plný (válec), nízký a plný (disk), či vysoký a dutý (mezikruží). Tyto varianty znázorňuje Obr. 2.5. Nejvyužívanější variantou je nízký dutý válec, tedy mezikruží, či prstenec (Obr. 2.6). Řez mezikružím ve vertikálním směru naznačuje Obr. 2.4c. Tvar vzorkového prostoru umožňuje provedení libovolně dlouhého, a přitom nepřerušeného smyku. Do vzorkového prostoru je umisťován zpravidla rekonstituovaný vzorek. Stanovení reziduální pevnosti nevyžaduje použití neporušeného vzorku, který by navíc bylo obtížné do přístroje umístit. Svrchní část vzorkového kontejneru má možnost vertikálního pohybu. Umožňuje tak přenos normálového napětí (zpravidla pomocí pákového mechanismu), a tedy i konsolidaci vzorku před zahájením smyku a měření změny výšky vzorku v průběhu smyku. Spodní část vzorkového kontejneru bývá pevná, druhou je kontinuálně otáčeno kolem středové osy, čímž vzniká smyková plocha. Odpor zeminy vůči smyku (dvojice sil) je měřen tzv. dynamometry.

Přes značné přednosti pro stanovování reziduální pevnosti má rotační smyková krabice i řadu nedostatků. Jsou jimi například úniky materiálu ze vzorkového prostoru během zkoušky či nerovnoměrná distribuce napětí ve vzorku, způsobená rozdílem rychlostí posunu mezi vnitřním a vnějším průměrem prstence. Únik materiálu je sice relativně malý, avšak při déletrvajících zkouškách může výsledek značně ovlivnit. Rotační smyková krabice však stále zůstává nejvhodnějším přístrojem, kterým lze reziduální pevnost stanovit.

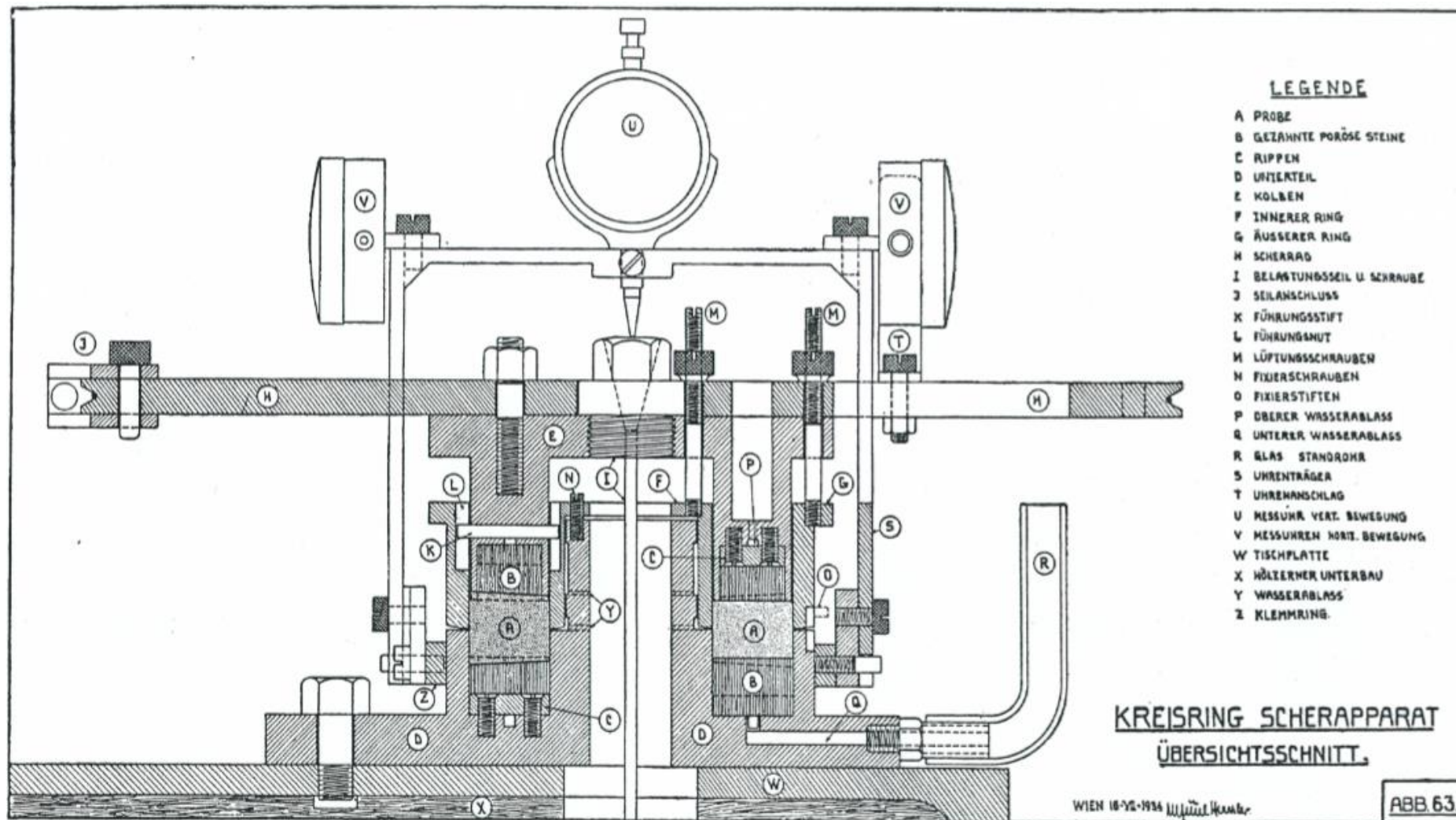
Schéma jednoho z prvních rotačních smykových přístrojů zobrazuje Obr. 2.7. Podrobný přehled vývoje rotačních přístrojů do začátku 70. let 20. století uvádí Bishop, et al. (1971) (Obr. 2.5 a Obr. 2.6). Od té doby souhrn výzkumu rotačních smykových přístrojů provedl například Parathiras (1994) ve své doktorské práci. V kapitole 4.2 je podrobně popsán rotační smykový přístroj navržený Bromheadem (1979), který byl použit pro laboratorní zkoušky v rámci této práce.

SHAPE OF FAILURE SURFACE	LOADING SYSTEM	SAMPLE TYPE	REFERENCE
CIRCLE		SOLID CYLINDER LOADED NORMALLY, LOWER PLATEN TWISTED	A.S.C.E. (1917)
CIRCLE		SOLID CYLINDER LOADED NORMALLY & TWISTED	STRECK (1928) FRANZIUS ET AL. (1929) (see HVORSLEV, 1939)
CIRCLE		SOLID CYLINDER LOADED NORMALLY & TWISTED	LANGER (1938) (see HVORSLEV, 1939)
CIRCLE		SOLID DISC LOADED NORMALLY & TWISTED	SEMBENELLI & RAMIREZ (1968) LA GATTA 1970
ANNULUS		SOLID DISC LOADED NORMALLY, ANNULUS TWISTED	TIEDEMANN (1937) (see HVORSLEV, 1939)
CIRCLE		SOLID DISC LOADED NORMALLY & TWISTED	GHANI (1966)
CYLINDER		HOLLOW CYLINDER LOADED RADIALLY & TWISTED	CASAGRANDE & U.S. ENGINEER OFFICE, BOSTON, MASS. (see HVORSLEV, 1939)

Obr. 2.5: Základní principy některých typů válcových, diskových a mezikružních rotačních smykových přístrojů (Bishop et al., 1971).

SHAPE OF FAILURE SURFACE	LOADING SYSTEM	SAMPLE TYPE	REFERENCE
ANNULUS		UNCONFINED ANNULAR DISC LOADED NORMALLY & TWISTED	COOLING & SMITH (1935, 1936)
ANNULUS		ANNULAR DISC LOADED NORMALLY & TWISTED	GRÜNER & HAEFELI (1934) HAEFELI (1938) (see HVORSLEV, 1939)
ANNULUS		ANNULAR DISC LOADED NORMALLY & TWISTED	TIEDEMANN (1937) (see HVORSLEV, 1939)
ANNULUS		ANNULAR DISC LOADED NORMALLY & TWISTED	HVORSLEV (1937, 1939) HVORSLEV & KAUFMAN (1952) HERRMANN & WOLFSKILL (1956)
ANNULUS		ANNULAR DISC LOADED NORMALLY & TWISTED	LA GATTA (1970)
ANNULUS		ANNULAR DISC LOADED NORMALLY & TWISTED	NOVOSAD (1964)
ANNULUS		ANNULAR DISC LOADED NORMALLY & TWISTED	CARR & WALKER (1968)
ANNULUS		ANNULAR DISC LOADED NORMALLY & TWISTED	SCARLETT & TODD (1968)

Obr. 2.6: Základní principy některých typů prstencových rotačních smykových přístrojů (Bishop et al., 1971).



Obr. 2.7: Schématické znázornění jednoho z prvních rotačních smykových přístrojů (Hvorslev, 1937).

3. Vliv obsahu jílové frakce na reziduální pevnost

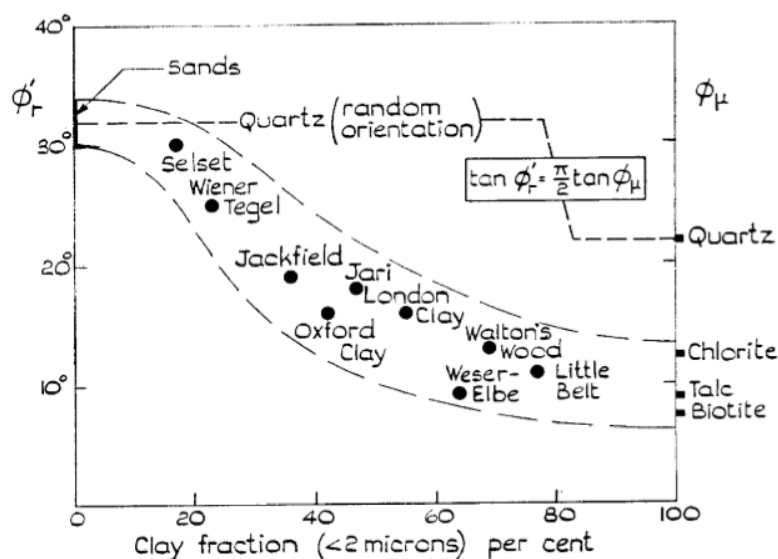
Základním faktorem umožňujícím dosažení reziduální pevnosti jsou ploché částice, mezi kterými, po paralelním uspořádání ve směru působení smykových sil, dochází ke kluznému pohybu. Takovými částicemi mohou být slídy (popisuje kapitola 3.1.3) nebo jílové minerály. Většina jílových minerálů má velikost zrn menší než 2 μm , proto je touto hranicí shora omezena jílová frakce. Pojem jílová frakce bývá definován pomocí sedimentačních analýz a Stokesova zákona jako přítomnost kulatých zrn o průměru menším než 2 μm (Mesri & Cepeda-Diaz, 1986). Avšak ne všechna zrna menší než 2 μm , jsou jílovými minerály, a ne všechny jílové minerály jsou ploché. Například zrna attapulgitu mají jehlicový tvar. Korelace jílové frakce (chápané podle Stokesova zákona) a plochosti částic je tedy nepřímá (Mesri & Cepeda-Diaz, 1986), proto je při použití tohoto pojmu důležité znát mineralogické složení. Pokud je zvolen vhodný (plochý) minerál, je mezi reziduální pevností a množstvím jílové frakce jasně patrný vztah.

3.1 Historie korelace reziduální pevnosti s obsahem jílové frakce

Čím vyšší je obsah jílové frakce, tím nižší je hodnota reziduální pevnosti. To potvrdila řada autorů. Tato kapitola přináší přehled vybraných prací, které se korelací reziduální pevnosti s obsahem jílové frakce (jílových minerálů) zabývaly.

3.1.1 Skempton (1964)

Skempton (1964) dal do závislosti obsah jílové frakce a velikost úhlu vnitřního tření v reziduálním stavu několika normálně konsolidovaných a překonsolidovaných přírodních jílů (Obr. 3.1). Z výsledného grafu, který ukázal pokles hodnoty úhlu vnitřního tření se zvyšujícím se obsahem jílové frakce, odhadl hranice pro obecný vztah (přerušované čáry na Obr. 3.1).



Obr. 3.1: Pokles úhlu vnitřního tření v reziduálním stavu s narůstajícím obsahem jílové frakce (Skempton, 1964).

3.1.2 Kenney (1967)

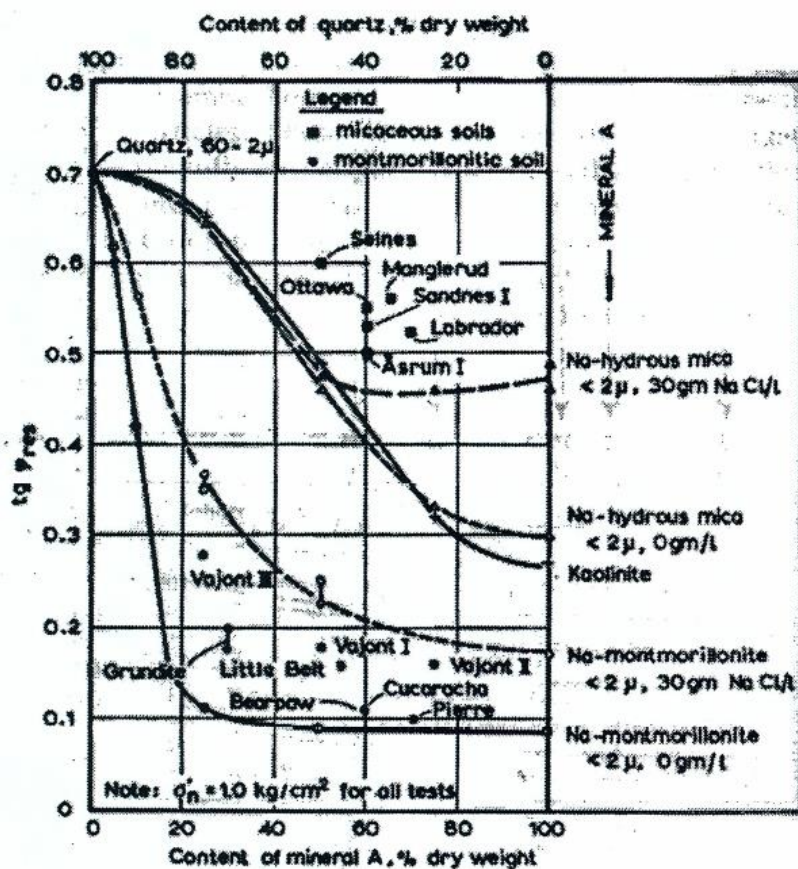
Kenney (1967) se zabýval především vlivem mineralogického složení na hodnotu reziduální pevnosti přírodních zemin. Prováděl obousměrné translační smykové zkoušky na vzorcích přírodních zemin, čistých minerálů a směsí minerálů (Tabulka 1). Výslednou pevnost udával součinitel tření ($\tan \phi_{res}$).

Nejprve dělal smykové zkoušky na vzorcích přírodních zemin, které rozdělil do tří kategorií: senzitivní jíly z Norska a Kanady, silně překonsolidované jíly a jílovité břidlice z Evropy a Ameriky a propláskové jíly z vápencového souvrství v Itálii. Vzorky byly buď neporušené, s předem vytvořenou smykovou plochou, nebo rekonstituované. Obě možnosti dávaly totožné výsledky. Každý vzorek zkoušel při různých normálových napětích (10 až 400 kPa). Na Obr. 3.2 je závislost součinitele tření na obsahu jílových minerálů („mineral A“ představuje součet všech přítomných jílových minerálů) pro jednotlivé zeminy. Výsledná reziduální pevnost byla vysoká, pokud zeminy obsahovaly velké množství „masivních“ minerálů (křemen, živec, kalcit), chloritu nebo jílových minerálů slídové skupiny. Vysoká byla také tehdy, když zeminy obsahovaly pouze malé množství montmorillonitu.

Ve své práci dále zkoumal vliv velikosti a tvaru zrn na hodnotu reziduální pevnosti masivních minerálů (saharského písku a drcené první skupiny minerálů – Tabulka 1). Zjistil, že reziduální pevnost je nezávislá na velikosti zrn či na hodnotě normálového napětí. Muskovit, hydratovanou slídu a montmorillonit zkoušel ve dvou různých velikostech zrn a při různých koncentracích soli v pórové vodě. Z výsledků usoudil, že nárůst pevnosti

způsobuje zvýšená koncentrace iontů v pórové vodě a kationty vysokého mocenství a vyšší polarizovatelnosti.

Poslední zkoušenou skupinou byly směsi minerálů. K tvorbě směsí použil čisté minerály. Míchal v různých poměrech vždy křemen („masivní“ minerál) s jílovým minerálem (hydratovaná slída, kaolinit nebo montmorillonit). Směsi obsahující hydratovanou slídu a montmorillonit zkoušel také s NaCl v pórové vodě (koncentrace 30 gm/l). Výsledky, ze kterých vyplývá závislost reziduální pevnosti ($tg\varphi_{res}$) na obsahu jílového minerálu („mineral A“) ukazuje Obr. 3.2. Pokud by obě složky směsi měly stejný vliv na pevnost, byly by křivky na Obr. 3.2 symetrické podle bodu, představujícího poměr minerálů ve směsi 50:50. Tomu se blíží směs obsahující kaolinit a hydratovanou slídu bez NaCl. Křivky zbylých směsí jsou však výrazně asymetrické. Autor tvrdí, že to může být způsobeno stanovením poměrů směsí ze suché hmotnosti, zatímco reziduální pevnost je závislá spíše na poměru relativního objemu minerálů (objem při přítomnosti vody). Rozdílné křivky směsí stejných minerálů, ale různého složení pórové vody, naznačují závislost reziduální pevnosti na chemismu pórové vody.



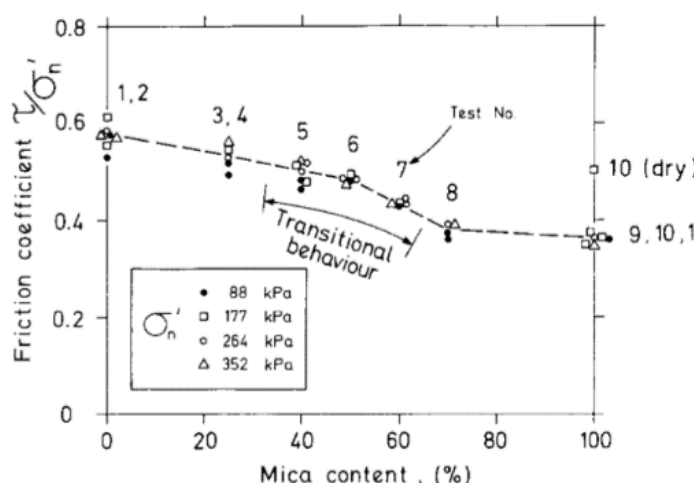
Obr. 3.2: Závislost reziduální pevnosti ($tg\varphi_{res}$) na obsahu minerálu A přírodních zemin a směsí minerálů, viz Tabulka 1 (Kenney, 1967).

Tabulka 1: Vlastnosti a obsahy minerálů přírodních zemín a minerálů použitých při testech (Kenney, 1967).

Natural Soil or Mineral (Reference)	Origin	Salinity (1)		Plasticity		Grain Size		Cation Exchange Capacity m. eqv. per 100 gm	Massive Minerals (% dry weight)					Clay Minerals (% dry weight)					Residual State (2)	
		gm/l	w _L	w _P	Range	<2μ	Ac- tivity		Quartz	Feldspar	Calcite	Others	Total	Kaolin	Chlorite	Mica hydrous mica illite	Mixed layers with montmo- rillonite	Mont- mor- illonite	w _{res}	(g/g) _{res}
									%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Natural Soils																				
Selnes, Norway (Kenney, 1967 b)	Very sensitive clays	< 2	23	17	< 60	42	0.16	11	25	10		15	50		5	45			21	0.60
Manglerud III, Norway (Bjerrum and Landva, 1966)		< 2	34	21	< 60	44	0.30	11	15	15	1	5	35		15	45	5		25	0.56
Asrum I, Norway		< 2	37	22	< 60	43	0.34	9	15	15		10	40		15	45			25	0.50
Labrador, Canada (Kenney et al, 1967)		< 2	32	22	< 60	55	0.18	13	10	20			30		15	55			26	0.52
Ottawa (weathered), Canada		< 2	67	31	< 60	70	0.52	20	10	20	1	10	40		5	50	5		38	0.55
Sandnes I, Norway (Bjerrum, 1966)	Clay-shales	< 2	31	18	< 200	42	0.30	13	20	10	5	5	40		20	30	10		24	0.53
Sandnes II, Norway (Bjerrum, 1966)		< 2	71	28	< 60	80	0.55	-		10	5	10	25	5	15	40	10	5	52	0.25
Little Belt, Denmark (Hvorslev, 1960)		11	121	40	< 60	58	1.4	45	2		17	5	25	10		10	5	50	68	0.16
Bearpaw, Canada (Peterson, 1958, Ringheim, 1964)		low	117	35	< 60	50	1.6	25	20	5	1		25			15	60		69	0.11
Pierre, USA			145	42	< 20	56	1.8	39	15	5			20			10	<—70—>		78	0.10
Pepper, USA (Van Auker, 1963)			96	25	< 60	58	1.2	25	15	10	0.2	5	30	43		15	5	5	58	0.10
Cucaracha, Panama			59	32	< 100	(36)	0.7	61	10				10			<—90—>			42	0.11
Vajont I, Italy		Clay inter- beds in a limestone series	106	35	< 75	70	1.0	55	5	5	30	10	50				<—50—>		-	0.18
Vajont II, Italy			106	40	< 75	68	1.0	79	10		7	5	20			<—5—>	<—75—>		48	0.16
Vajont III, Italy Müller, 1964			62	18	< 60	52	0.8	27	5		40		45			<—30—>	<—25—>		27	0.28
Kenney, 1967 a)																				
Minerals (3)																				
Quartz	Crushed				60-2	≈ 0			100										33	0.69
Quartz	"				< 2	100			100										-	0.70
Feldspar (microcline and albite)	"				60-2	≈ 0				100									30	0.69
Feldspar (microcline and albite)	"				< 2	100				100									-	0.69
Calcite	"				60-2	≈ 0					100								22	0.69
Sahara sand (4)	Dune				> 200	0													33	0.58
SiO ₂ (amorphous) (5)	Flue dust		33	28	0.5-0.01	100	0.05	2											35	0.56
Attapulgit		≈ 0	345	105	< 60	74	3.2	22	< 5										161	0.57
Muscovite	Crushed	≈ 0			60-20	0										100			97	0.36
Muscovite	"	≈ 0	63	55	< 2	100	0.08	28								100			70	0.45
Na-muscovite	"	30	98	62	< 2	100	0.36	28								100			-	0.34
Na-muscovite	"	≈ 0			< 2	100		28								100			-	0.31
Na-hydrous mica	Fine fraction of Selnes quick clay	30	99	39	< 2	100	0.60	38		5		5	10		5	85			46	0.43
Na-hydrous mica		≈ 0	51	33			0.18												39	0.29
K-hydrous mica		30	118	46			0.72												47	0.46
K-hydrous mica		≈ 0	84	39			0.45												45	0.35
Ca-hydrous mica		15																	41	0.47
Ca-hydrous mica		≈ 0																	42	0.44
Na-hydrous mica		30	151	53	< 0.5	100	0.98	28		5		5	10		5	85			51	0.45
Na-hydrous mica		≈ 0	87	46	< 0.5	100	0.41	28		5		5	10		5	85			-	0.37
Kaolinite		≈ 0	59	37	< 10	72	0.31	9						95		< 5	< 5		55	0.21
Na-montmorillonite	Fine fraction of KWK bentonite	30	620	45	< 2	100	5.8	115										100	220	0.18
Na-montmorillonite		≈ 0	1,325	53	< 2	100	12.7	115										100	465	0.07
Na-montmorillonite		30	995	47	< 0.1	100	9.5											100	160	0.15
Na-montmorillonite		≈ 0	1,995	56			19.4												445	0.07
Ca-montmorillonite			CaSO ₄	775	47		7.3												116	0.18
montmorillonite		≈ 0	795	47			7.4												135	0.17
Treated Soil																				
Na-Grundite, USA		30	130	43	< 2	100	0.85	26								70	30		69	0.18
Na-Grundite, USA		≈ 0	164	46			1.2												78	0.20
Ca-Grundite, USA		≈ 0	163	49			1.2												80	0.18

3.1.3 Lupini, Skinner & Vaughan (1981)

Vliv obsahu jílových zrn na reziduální pevnost zeminy, jak ukázal Kenney (1967), je velice dobře možné sledovat na uměle připravených směsích různých druhů jílových minerálů s hrubší trojrozměrnou frakcí. Postupovali tak také Lupini et al. (1981), kteří provedli tři série testů v rotačním smykovém přístroji. V každé sérii zkoušeli dva různé materiály a jejich kombinace v různých poměrech. V první sérii použili komerčně dostupnou práškovou slídu jako plochý minerál a středně až dobře zrněný křemenný písek jako trojrozměrný materiál. Materiály zkoušeli samostatně (test 1, 2, 9, 10 a 11) a také ve směsích (test 3, 4, 5, 6, 7 a 8) (shrnutí v Tabulce 2 Tabulka 2) při různých normálových napětích. Výsledky zkoušek odpovídají předpokladu snižování pevnosti se vzrůstajícím obsahem plochých částic. Zobrazuje je graf na Obr. 3.3.



Tabulka 2: Zkoušky na písku, práškové slídě a jejich směsích (převzato z Lupini et al., 1981).

Test	Slída (%)	Průměrná hodnota τ_R/σ_n'
1, 2	0	0,57
3, 4	25	0,53
5	40	0,50
6	50	0,48
7	60	0,43
8	70	0,38
9, 10, 11	100	0,36

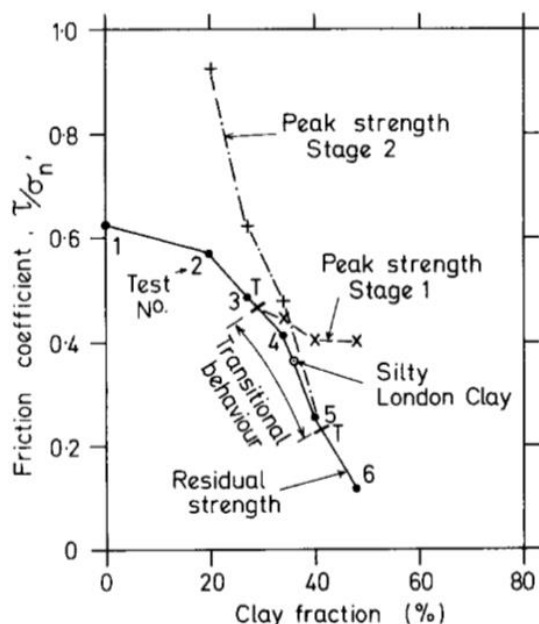
Obr. 3.3: Reziduální koeficient tření směsí písku a slídy, jako funkce obsahu slídy, viz Tabulka 2 (Lupini et al., 1981).

Autoři výslednou pevnost definují pomocí reziduálního koeficientu tření (τ_R / σ_n'), který je podílem reziduálního smykového napětí τ_R a normálového efektivního napětí σ_n' . Úhel vnitřního tření v reziduálním stavu φ_R' je pak za předpokladu nulové soudržnosti ($c_r' \equiv 0$) dán vztahem:

$$\varphi_R' = \arctan\left(\frac{\tau_R}{\sigma_n'}\right) \quad (1)$$

Druhou sérii provedli na dvou přirozených zeminách a jejich směsích. Těmito zeminami byly londýnský jíl a happisburghský jíl. Jejich kombinováním dosahovali různých

obsahů přírodních jílů, pohybujících se v rozmezí od 20 % jílové frakce pro čistý happisburghský jíl, po 48 % jílové frakce pro čistý londýnský jíl (Tabulka 3). Výsledná křivka, která jasně znázorňuje pokles koeficientu tření se vzrůstajícím obsahem jílové frakce, je na Obr. 3.4.

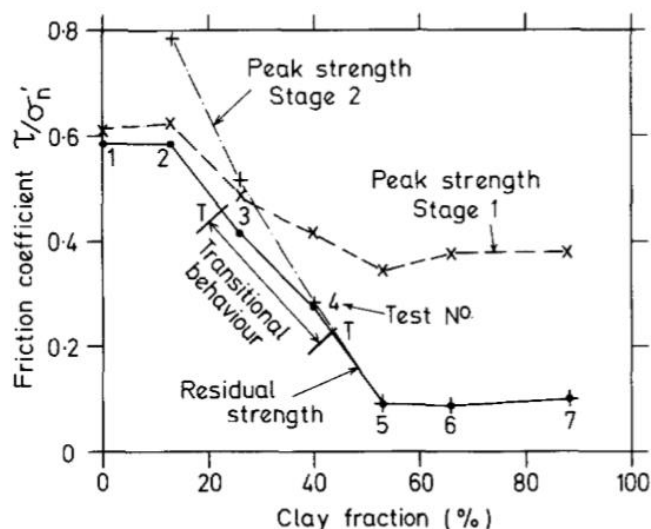


Tabulka 3: Testy na happisburghském jílu, londýnském jílu a jejich směsích (převzato z Lupini et al., 1981).

Test	Zemina	Obsah jílové frakce (%)	Průměrná hodnota τ_R/σ'_n
1	Písčítá frakce happisburgh. jílu	0	0,635
2	happisburgh. jíl	20	0,58
3	75 % happisburgh./ 25 % londýnský jíl	27	0,48
4	50 % happisburgh./ 50 % londýnský jíl	34	0,41
5	25 % happisburgh./ 75 % londýnský jíl	40	0,25
6	Londýnský jíl	48	0,12

Obr. 3.4: Vrcholový a reziduální koeficient tření happisburghského jílu, londýnského jílu a jejich směsí, jako funkce obsahu jílové frakce, viz Tabulka 3 (Lupini et al., 1981).

Pro třetí sérii použili opět uměle připravené směsi. Míchali dobře zrněný křemenný písek a sodný bentonit. Každou zkoušku prováděli alespoň pro dvě efektivní normálová napětí. První stupeň vždy pro vyšší normálové napětí než pro stupeň druhý. Jednotlivé zkoušky včetně úrovní normálového napětí shrnuje Tabulka 4 a výslednou závislost koeficientu tření na obsahu jílové frakce Obr. 3.5. Z důvodu nelinearity obálky pevnosti (Stark & Eid, 1994) by měly být hodnoty reziduální pevnosti při nízkých normálových napětích vyšší než hodnoty při vyšších normálových napětích. Při testech 3 až 6 však v prvních stupních (vyšší normálové napětí) naměřili vyšší hodnoty koeficientu tření než ve druhých stupních se sníženým normálovým napětím. Toto atypické chování vysvětlují tím, že použitý bentonit byl průmyslově připravený sodný montmorillonit, obsahující sodné sole, které v průběhu zkoušek (dva až čtyři týdny), pomalu difundovaly z pórové vody do okolní „vodní lázně“, čímž se snížila měřená pevnost.

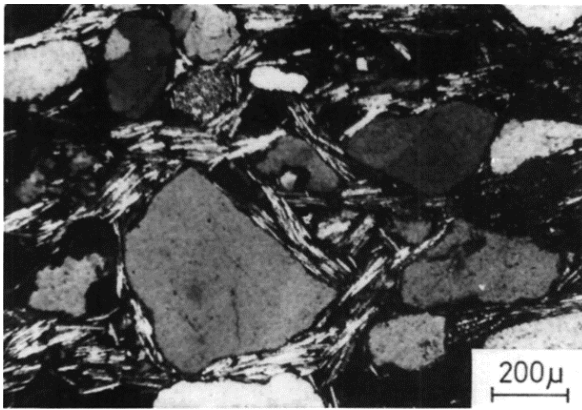


Obr. 3.5: Vrcholový a reziduální koeficient tření písku, bentonitu a jejich směsí jako funkce obsahu jílové frakce, viz Tabulka 4 (Lupini et al., 1981).

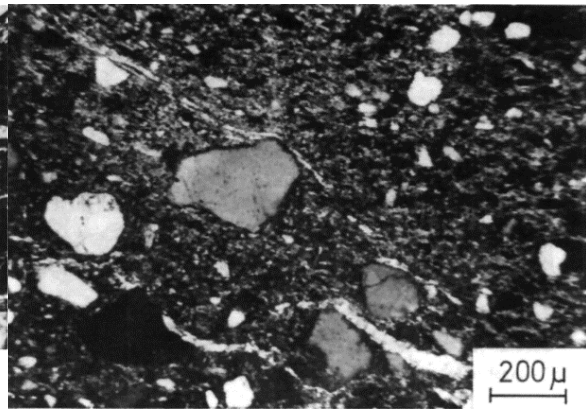
Tabulka 4: Testy na písku, bentonitu a jejich směsích (převzato z Lupini et al., 1981).

Test	Zemina	Obsah jílové frakce (%)	Normálové efektivní napětí (kPa)	Hodnota τ_R/σ'_n
1	Písek	0	352; 177; 352	0,59; 0,58; 0,59
2	85 % písek/ 15 % bentonit	13	352; 177	0,59; 0,58
3	70 % písek/ 30 % bentonit	26	352; 177	0,44; 0,40
4	55 % písek/ 45 % bentonit	40	352; 177	0,30; 0,25
5	40 % písek/ 60 % bentonit	53	352; 177	0,12; 0,08
6	25 % písek/ 75 % bentonit	66	352; 177	0,10; 0,07
7	Bentonit	88	703; 352; 177; 352	0,11; 0,09; 0,10

U všech sérií testů je jasně patrný trend poklesu hodnoty reziduální pevnosti se vzrůstajícím obsahem jemné frakce (Obr. 3.3, Obr. 3.4, Obr. 3.5). Součástí všech tří sérií bylo také podrobné zkoumání smykových zón na výbrusech zkoušených vzorků (Obr. 3.7), které Lupini et al. (1981) prováděli především za účelem odhalení mechanismu smykového chování. Výbrusy zkoumali optickým polarizačním mikroskopem a rastrovacím elektronovým mikroskopem (pouze směsi londýnského a happisburghského jílu). Příkladem je Obr. 3.6, který ukazuje zrna písku (75 %) a slídy (25 %) uspořádaná smykem a Obr. 3.7, zobrazující smykovou plochu ve směsi happisburghského a londýnského jílu, při 40% obsahu jílové frakce.



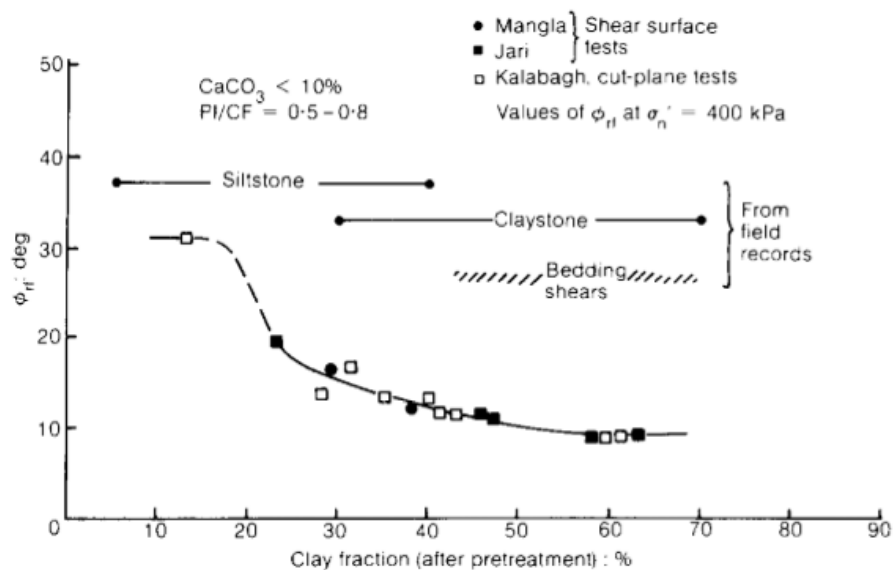
Obr. 3.6: Výbrus směsi slidy (25 %) a písku (75 %) po smyku (test 4) v polarizačním světle (Lupini et al., 1981).



Obr. 3.7: Výbrus směsi happisburghského a londýnského jílu (40 % jílové frakce) po smyku (test 5), ukazující smykovou plochu jdoucí z levého horního do pravého dolního rohu (Lupini et al., 1981).

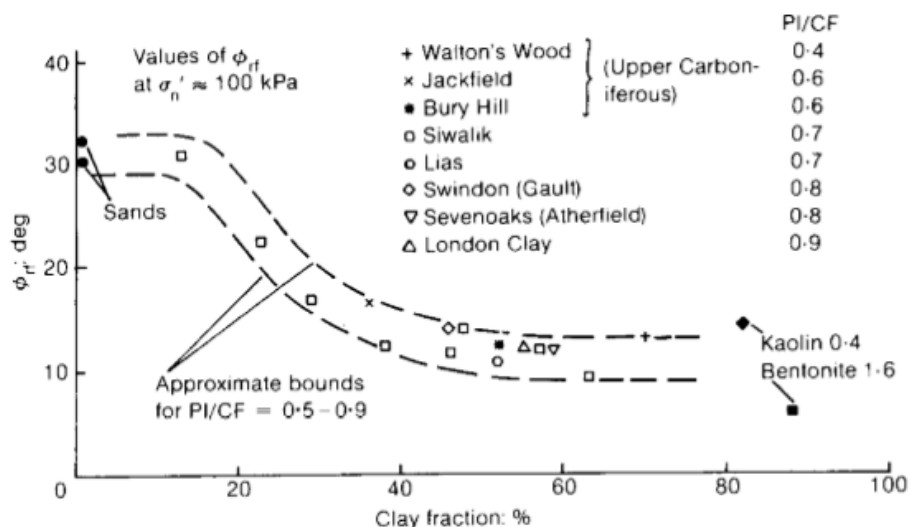
3.1.4 Skempton (1985)

Skempton (1985) našel vztah mezi reziduální pevností a jílovou frakcí tak, že provedl několik krabicových smykových zkoušek na vzorcích pákistánských jílovců a prachovců odebraných s přirozeně utvořenou smykovou plochou (Obr. 3.8). Reziduální pevnost zjištěnou na této ploše nazývá polní reziduální pevností (*field residual*).



Obr. 3.8: Polní reziduální pevnosti pákistánských jílovců a prachovců (Skempton, 1985).

Srovnával také řadu laboratorních zkoušek písku, kaolinu a bentonitu z různých zdrojů (Obr. 3.9).



Obr. 3.9: Reziduální pevnosti písku, kaolinu a bentonitu z rotačních smykových zkoušek (Skempton, 1985).

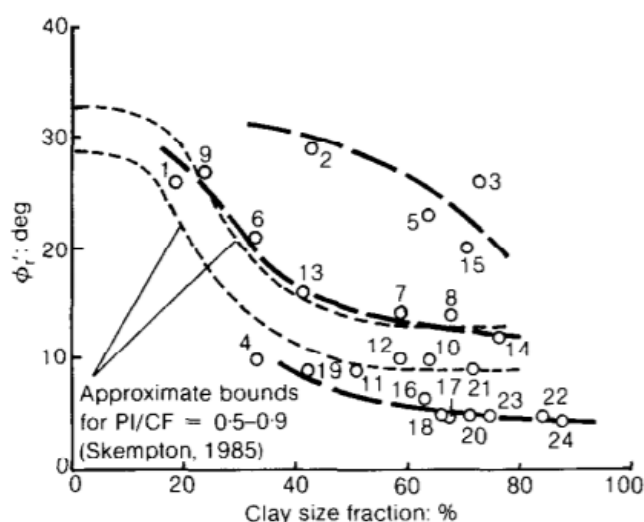
Oba obrázky potvrzují závislost reziduální pevnosti na obsahu jílové frakce přírodních zemin. Z pozorovaného trendu usoudil, že jakmile obsah jílové frakce v zemině klesne pod 25 %, nedojde ke snížení pevnosti z kritické na reziduální a zemina se chová spíše jako písek či prach, s úhlem vnitřního tření nad 20°. Pokud se obsah jílové frakce pohybuje okolo 50 %, je reziduální pevnost řízena téměř výlučně kluzným třením jílových minerálů. Další nárůst obsahu jílové frakce má na reziduální pevnost pouze malý efekt. Když obsah jílové frakce leží mezi těmito hranicemi, dochází k přechodu chování a reziduální pevnost se stává závislou na množství a charakteru jílových zrn.

3.1.5 Mesri & Cepeda-Diaz (1986)

Mesri & Cepeda-Diaz (1986) věnovali svou studii měření velikosti reziduální pevnosti břidlic. Břidlici popisují jako vysoce překonsolidovaný jíl s různým stupněm zpevnění. Tabulka 5 shrnuje vlastnosti jednotlivých vzorků břidlic. Reziduální pevnost vzorků s předem vytvořenou smykovou plochou měřili ve dvousměrném translačním smykovém přístroji. Pro každou břidlici provedli vždy dvě zkoušky. Výsledky s mezemi podle Skempton (1985) jsou na Obr. 3.10. Stanovené oblasti odpovídala jen část vzorků. Hodnoty pod nižší hranicí odpovídaly břidlicím obsahujícím 30-80 % montmorillonitu. Výsledky nad vyšší hranicí patřily břidlicím, obsahujícím buď trojrozměrné jílové minerály nebo vysoce stabilní zrna jílových minerálů. Z toho vyplývá, že záleží na tvaru (mineralogii) zrn, nikoli pouze na velikostní frakci.

Tabulka 5: Souhrn měřených indexových parametrů vzorků břidlic (Mesri & Cepeda-Diaz, 1986).

Shale	Formation	Location	w ₀ : %	LL: %	PL: %	CF: %	PI/CF	w _f : %
1	Duck Creek	Fulton	5.3	37	25	19	0.63	19–22
2	Chinle (red)	Holbrook	10.9	39	20	43	0.44	18–21
3	Colorado	Montana	5.6	46	25	73	0.29	22–25
4	Four Fathom	Durham	3.3	50	24	33	0.79	24–25
5	Mancos	Price	4.9	57	24	64	0.52	24–30
6	Vale	Vernon	11.4	59	27	33	0.97	26–31
7	Crab Orchard	Estill	4.3	60	31	59	0.49	33–
8	Comanche	Proctor Dam	11.5	62	32	68	0.44	31–35
9	Laramie	Limon	20.3	63	32	24	1.29	30–34
10	Fort Union	Stanton	17.9	64	34	64	0.47	33–37
11	Bearpaw	Billings	15.7	68	24	51	0.86	24–28
12	Patapsco	Washington	21.6	77	25	59	0.88	28–34
13	Pierre	Limon	24.3	82	30	42	1.24	36–42
14	Taylor	Granger Dam	16.5	88	28	77	0.78	31–38
15	Mowry	New Castle	10.0	95	32	71	0.89	35–43
16	Cucaracha	Panama Canal	18.4	111	42	63	1.10	51–
17	Pierre	New Castle	21.3	113	30	67	1.24	38–42
18	Denver	Denver	30.5	121	37	67	1.25	47–54
19	Bearpaw	Saskatchewan Dam	27.3	128	27	43	2.35	41–46
20	Claggett	Benton	11.7	157	31	71	1.78	–40
21	Taylor	San Antonio	35.2	170	39	72	1.82	52–58
22	Pierre	Reliance	42.8	184	55	84	1.54	62–76
23	Chinle (grey)	Holbrook	20.3	192	43	75	1.99	58–63
24	Bearpaw	Fort Peck Dam	15.8	288	44	88	2.77	64–84

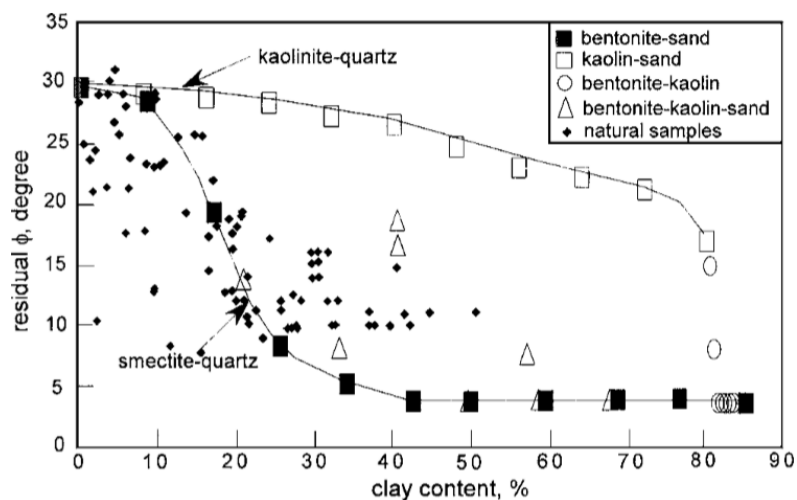


Obr. 3.10: Závislost úhlu vnitřního tření v reziduálním stavu na obsahu jílové frakce, viz Tabulka 5 (Mesri & Cepeda-Diaz, 1986).

3.1.6 Tiwari & Marui (2005)

S úmyslem co nejvíce se při korelaci reziduální pevnosti s jílovou frakcí přiblížit přirozeným zeminám, vytvářeli Tiwari & Marui (2005) směsi obsahující tři základní minerály - kaolinit, smektit a křemen. Kombinovali křemenný písek, komerční kaolin (kaolinit, křemen a živec) a komerční bentonit (smektit, cristobalit, illit a křemen) v poměrech od 0 do 100 % při kroku 10 %. Součástí jejich studie bylo rovněž zkoušení osmdesáti vzorků přírodních zemin ze svahových deformací a z vulkanické oblasti. Zkoušky prováděli v rotačním smykovém přístroji. Obr. 3.11 představuje výslednou závislost reziduální pevnosti na obsahu jílové frakce. Na křivce směsi bentonitu a písku je závislost

jasně patrná, zatímco křivka směsi kaolinu a písku vykazuje vliv o poznání menší. Rozdíl potvrzuje význam mineralogie (tvaru) zrn. Mezi křivkami se pak podle očekávání pohybují body představující směsi bentonitu, kaolinu a písku. V případě přírodních zemin nelze, kvůli různorodosti obsažených minerálů, provést příliš přesnou korelaci.



Obr. 3.11: Závislost hodnoty reziduální pevnosti na obsahu jílové frakce (Tiwari & Marui, 2005).

3.1.7 Shrnutí

Uvedené příklady zkoušených materiálů (přírozené zeminy, uměle vytvořené směsi dvou či více minerálů, směsi přírodních zemin, břidlice) dokazují, že závislost mezi reziduální pevností a obsahem jílové frakce existuje. Ve všech případech bylo totiž možné sledovat pokles reziduální pevnosti se zvyšujícím se obsahem jílové frakce. Míra závislosti však nebyla vždy stejná. Názorným příkladem je Obr. 3.11. Důvodem je především různá mineralogie (tvar zrn) zkoušených materiálů. Proto se hranice, které uvádí Skempton (1985), nedají použít obecně.

Ve třetí části této práce jsem se podobnými postupy, zmíněnými v předchozích částech kapitoly 3.1, pokusila získat tentýž typ závislosti, abych ověřila její existenci.

3.2 Vliv dalších parametrů na reziduální pevnost

Hodnota reziduální pevnosti je kromě množství jílové frakce ovlivňována řadou dalších faktorů. Mezi hlavní patří typ jílových minerálů a podle něho se odvíjející index plasticity I_P a vlhkost na mezi tekutosti w_L (v angličtině LL), velikost normálového napětí σ' a velikost posunu. Zkoumání vlivu těchto faktorů však není náplní této práce.

4. Provedené zkoušky

Provedla jsem sérii zkoušek v rotačním smykovém přístroji na jílové frakci vzorku z lokality Dobkovičky. Abych zjistila křivku závislosti hodnoty reziduální pevnosti na množství jílové frakce, míchala jsem tuto frakci s komerčně dostupným jemnozrnným střeleckým pískem.

4.1. Popis vzorku

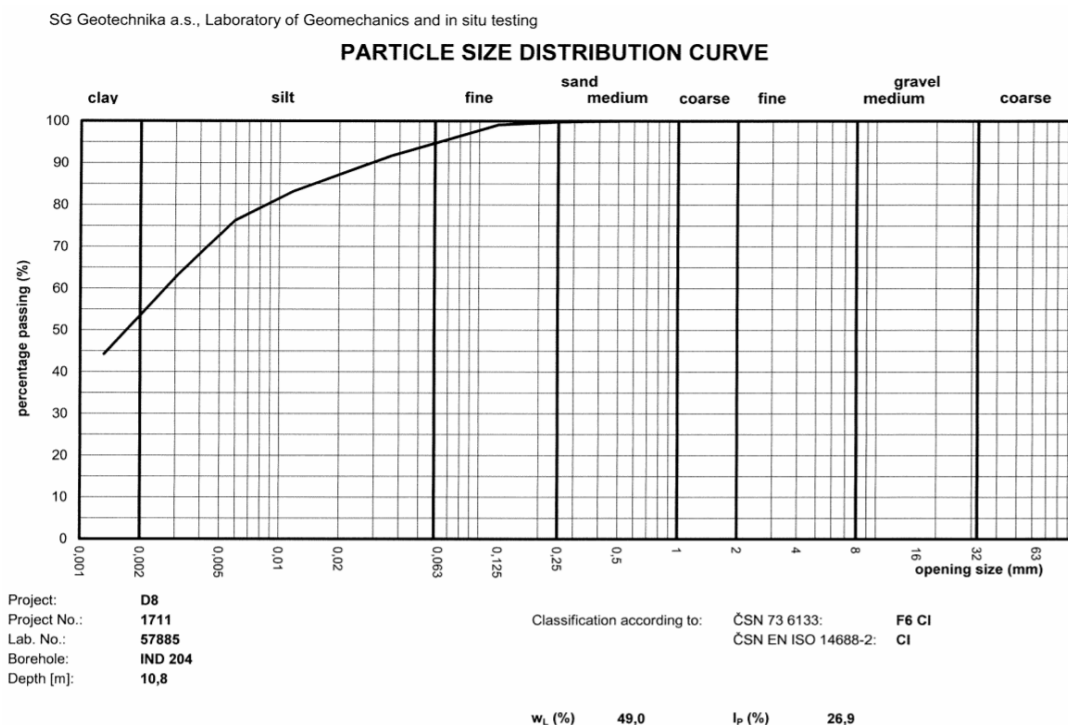
Vzorek, jehož jílovou frakci jsem použila ke smykovým zkouškám, byl odebrán v rámci inženýrsko-geologického doprůzkumu (Plšková et al., 2016) na lokalitě Dobkovičky, prováděném firmou ARCADIS CZ, a.s. Lokalita byla v roce 2013 postižena sesuvem, který zavalil část, v tu dobu nedokončeného, úseku dálnice D8 (Obr. 4.1) nedaleko města Lovosice. Nachází se v terciérním Českém Středohoří a v jeho křídových uloženinách.



Obr. 4.1: Sesuv na lokalitě Dobkovičky (www.ustecky.denik.cz, 2014).

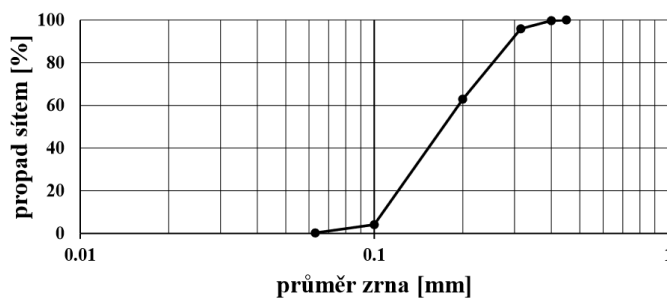
Vzorek byl odebrán z vrtu IND-204 (Obr. 4.4), situovaného na úpatí svahu v obci Litochovice, který zastihl vápnité slínovce a prachovce bělostné barvy (Plšková et al., 2016). Odběr provedl v prosinci 2016 Mgr. Jakub Roháč (PhD. student PřF UK), z hloubky 10,8

m. Jednalo se o křídový slín světle hnědé barvy. Zkoušky stanovení zrnitosti a konzistenčních mezí provedla společnost SG Geotechnika a. s., Laboratoř geomechaniky a terénní měření (Obr. 4.2).

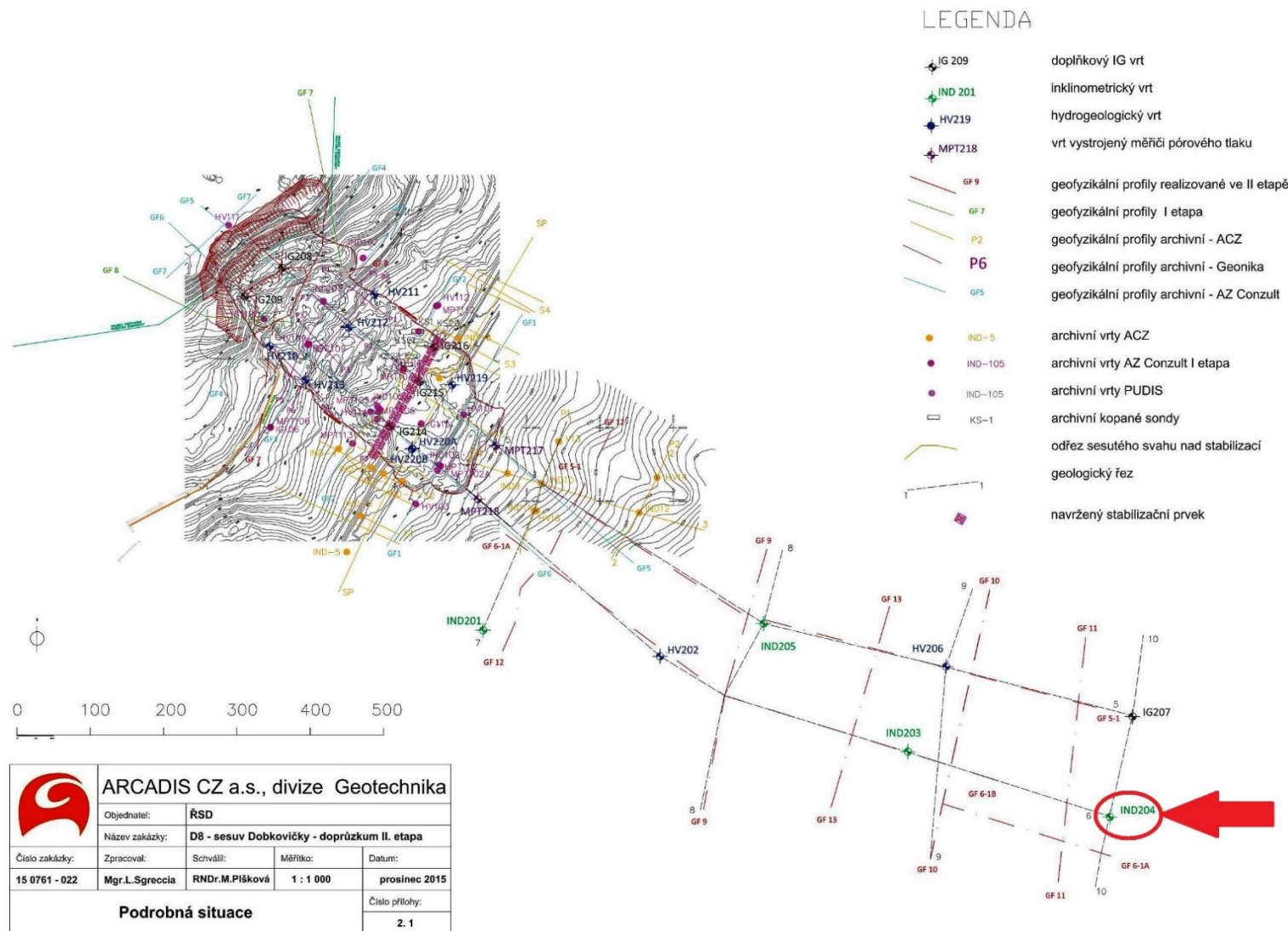


Obr. 4.2: Výsledky zkoušek stanovení zrnitosti a konzistenčních mezí (Němečková, 2018).

Druhým materiálem, který jsem k tvorbě směsí použila, byl křemenný písek z pískovny Sklopísek Střeleč, a. s. Pro účely smykových zkoušek jsem zvolila jemný sklářský písek s extrémně vysokým obsahem SiO_2 kvůli jeho jemnozrnnosti (zrna do velikosti 0,4 mm), která měla eliminovat zasekávání zrn mezi jednotlivé části vzorkového kontejneru krabice a také kvůli minimálnímu množství zrn menších než $63 \mu\text{m}$ (0,26 %). Křivka zrnitosti tohoto písku, kterou jsem vytvořila ze středních hodnot udávaných pískovnou, je na Obr. 4.3.



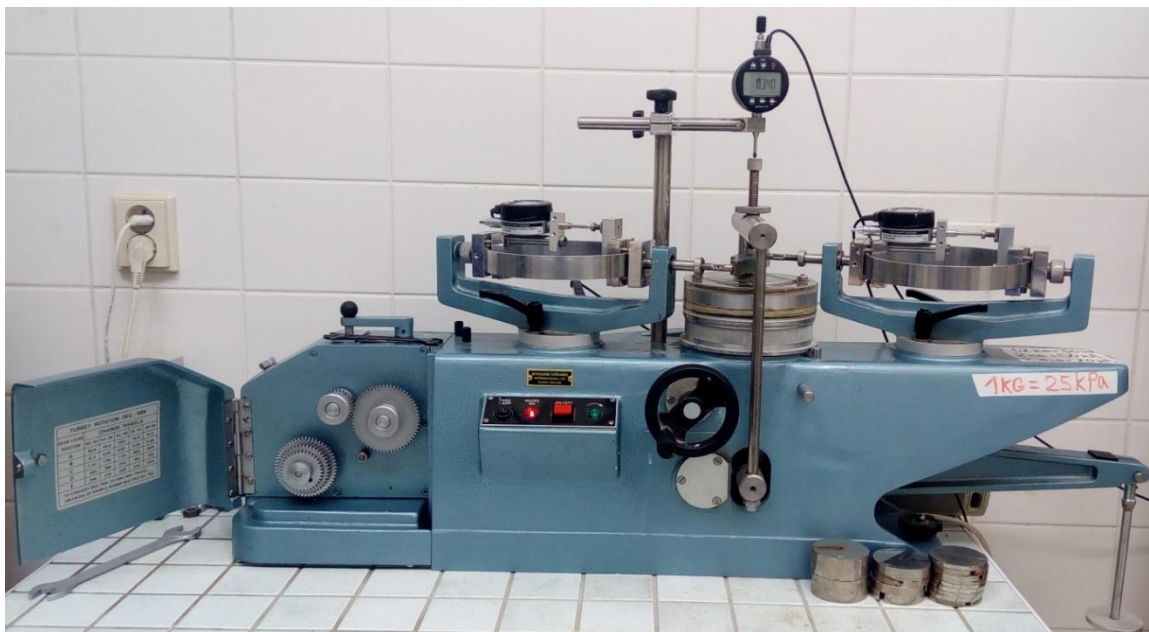
Obr. 4.3: Zrnitostní křivka střelečského písku, vynesená na základě údajů poskytovaných pískovnou.



Obr. 4.4: Podrobná situace doprůzkumu sesuvu na lokalitě Dobkovičky. Vrt IND-204, ze kterého byl zkoušený vzorek odebrán, je červeně vyznačen (Plšková et al., 2016, upraveno).

4.2 Popis použitého přístroje

Smykové zkoušky jsem prováděla v rotační smykové krabici typu Bromhead. Fotografie použitého přístroje je na Obr. 4.5 a částečný řez modelem přístroje na Obr. 4.6. Smyková krabice byla navržena a zkonstruována Bromheadem (1979) s úmyslem vytvořit jednoduchý, robustní, snadno ovladatelný a poměrně levný rotační smykový přístroj, který se stane běžnou součástí komerčních laboratoří.



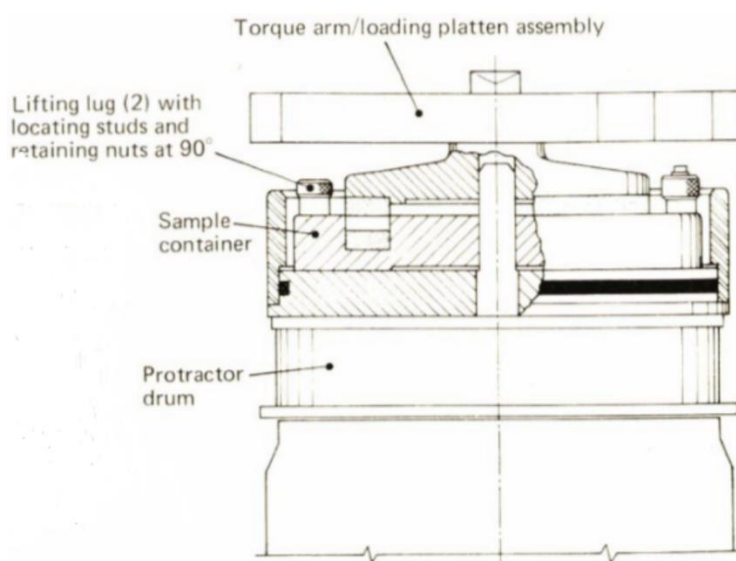
Obr. 4.5: Použitý rotační smykový přístroj typu Bromhead.

Vzorkový prostor krabice zapuštěný do vzorkového kontejneru je tvaru mezikruží o výšce 5 mm, vnitřním průměru 70 mm a vnějším průměru 100 mm. Vzorkový kontejner se pomocí dvou šroubů připevňuje k desce poháněné motorem, která se otáčí kolem osy centralizačního kolíku. Rychlost otáčení (od 0,024°/min do 60 °/min) je možné nastavit pomocí ozubených kol a převodovky. Na desku se nasadí plexisklový prstenec, čímž se vytvoří nádržka na vodu, umožňující saturaci vzorku v průběhu zkoušky.

Na centralizační kolík se nasune horní destička, která omezuje vzorek shora. Povrch horní i dolní podstavy vzorkového prostoru je z bronzového porézního materiálu. Ten umožňuje drenáž vzorku a jeho zdrsnění a radiální rýhy zabraňují vzniku smykové plochy na kontaktu se vzorkem.

Zatímco se vzorkový kontejner během zkoušky otáčí, horní destička je udržována ve stabilní poloze pomocí dvou dynamometrů, jenž jsou v kontaktu s jejími rameny. Digitální úchylkoměry měří stlačení dynamometrů způsobené tlakem ramen destičky, který odpovídá odporu zkoušené zeminy vůči smyku.

Vzorek je vertikálně stlačován pomocí pákového mechanismu, fungujícímu v poměru 10:1. Pákový mechanismus, zasazený do důlku horní destičky, umožňuje na vzorek přenést normálové napětí až 1000 kPa (Najser, 2004). Vertikální stlačení měří digitální úchylkoměr. Všechny úchylkoměry jsou připojeny k počítači, který zapisuje měřená data.



Obr. 4.6: Částečný řez modelem přístroje (Bromhead, 1979).

4.3 Metodika zkoušek

4.3.1 Separace jílu

Aby bylo možné provést smykové zkoušky na jílové frakci a na jejích směsích se střelečským pískem, bylo ji v první řadě třeba separovat z přirozené zeminy. K tomuto účelu jsem zvolila metodu dekantace popsanou ve skriptech Borovce (1992).

Před začátkem dekantace jsem vzorek hrubě mechanicky rozdružila a 1 kg vložila do válce (Obr. 4.7) a zalila ho přibližně 2 l destilované vody. Vzorek jsem promíchala a nechala ve válci do druhého dne. Následně jsem ho přesunula do hnětače na těsto, kde se další dva dny míchal minimálně 18 hodin.



Obr. 4.7: Rozdružený vzorek z lokality Dobkovičky.

Dalším krokem před začátkem dekantace, byl odhad času t (s), po který padá zrno o velikosti $2\ \mu\text{m}$ po dráze h (m) podle Stokesova zákona:

$$t = \frac{9h\eta}{2(\rho - \rho_0)gr^2}, \quad (2)$$

kde η je viskozita kapaliny ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), ρ je hustota zrna a ρ_0 hustota kapaliny ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), g je tíhové zrychlení ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) a r je poloměr částice (m).

Do vztahu (2) jsem dosadila tyto hodnoty: $h=0,1\ \text{m}$, $\eta=1,002\cdot 10^{-3}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$, $\rho=2,6783\cdot 10^{-3}$, $\rho_0=0,99823\cdot 10^{-3}$, $g=9,80665\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, $r=10^{-6}\ \text{m}$. Hustota zrna nebyla stanovena, proto jsem zvolila hustotu křemene. Výsledný čas byl 7 hodin 44 minut a 25 sekund.

Poté jsem provedla vlastní dekantaci. Homogenizovanou směs vzorku a destilované vody jsem rozdělila do tří nádob o minimální výšce 20 cm. Do nádob jsem doplnila takové množství vody, aby výška vodního sloupce činila alespoň 15 cm a poměr vzorku a vody byl ve všech nádobách stejný. Roztok jsem naposledy ručně promíchala a ponechala v klidu sedimentovat (Obr. 4.8). Po uplynutí vypočtené doby jsem do suspenze ponořila hadičku se zahnutým koncem, který jsem umístila 10 cm pod hladinu. Pomocí hadičky jsem odsála suspenzi nad jejím ústím. Kvůli časové náročnosti a velkému množství odebraného roztoku jsem výše zmíněný postup provedla pouze jednou.



Obr. 4.8: Nádoby se suspenzí při sedimentaci.

Po dekantaci bylo třeba značně snížit množství vody a dostat tak homogenní pastu, kterou by bylo možné umístit do vzorkového prostoru smykové krabice. Suspenzi jsem nejprve nechala sedimentovat v několika oddělených nádobách. Postupně se u hladiny vytvářela vrstva čiré vody, kterou jsem průběžně odebírala pomocí plastové injekční stříkačky. Jakmile se množství vody v jednotlivých nádobách dostatečně snížilo, slila jsem jejich obsah do jedné a tu jsem vložila do pece o teplotě 50 °C a její obsah každých deset minut míchala. Tento způsob byl však neúčinný a časově příliš náročný. Vhodnější metodou se ukázalo být zahřívání ve vodní lázni, kombinované se zahříváním svrchu lampou (Obr. 4.9). Pro udržení stálé teploty lázně, jsem použila plotnu s termostatem.



Obr. 4.9: Odpařování vody ze vzorku ve vodní lázni zahřívané svrchu lampičkou a ze spodu plotnou s termostatem.

4.3.2 Příprava směsí

Vysušený vzorek do podoby pasty o vlhkosti 1–1,5násobku vlhkosti na mezi tekutosti, jsem přendala do zvážené misky a část odebrala ke stanovení vlhkosti. Misku se vzorkem jsem zvážíla a zabalila do potravinové folie, abych zabránila odparu. Po spočtení vlhkosti jsem ze suché hmotnosti odseparované frakce vypočetla hmotnost suchého písku, kterou bylo do vzorku třeba dodat pro dosažení požadovaného poměru. Písek jsem přidala a několik minut míchala, abych získala homogenní směs. Touto směsí jsem vzápětí vyplnila vzorkový prostor přístroje. Misku se zbylou směsí jsem opět zvážíla a zabalila do fólie, abych do ní později mohla dosypat přepočtené množství suchého písku pro vytvoření jiného poměru směsi. Takto jsem připravila směsi o obsahu jílové frakce 60, 50 a 20 %.

Abych ověřila, zda je můj postup správný, odebrala jsem část z první odzkoušené směsi na změření vlhkosti a část na vlhké prosetí. Setím přes síto 63 μm jsem oddělila střelečský písek, který jsem vysušila a zvážíla. Pomocí zjištěné vlhkosti jsem dopočítala obsah jílové frakce. Poměr se lišil o méně než půl procenta.

Celkové množství vzorku bylo malé. Bylo tedy třeba s ním šetřit. Proto jsem do původní misky se zbytkem vzorku vracela veškerý použitý materiál čisté jílové frakce a míchala ho s destilovanou vodou, aby se opět homogenizoval. Setím přes síto 63 μm jsem se před jeho použitím zbavila případných nehomogenit a nečistot. Vzorek jsem opět vysušila ve vodní lázni a výše popsaným postupem použila k přípravě směsí o obsahu jílové frakce 75 a 35 %.

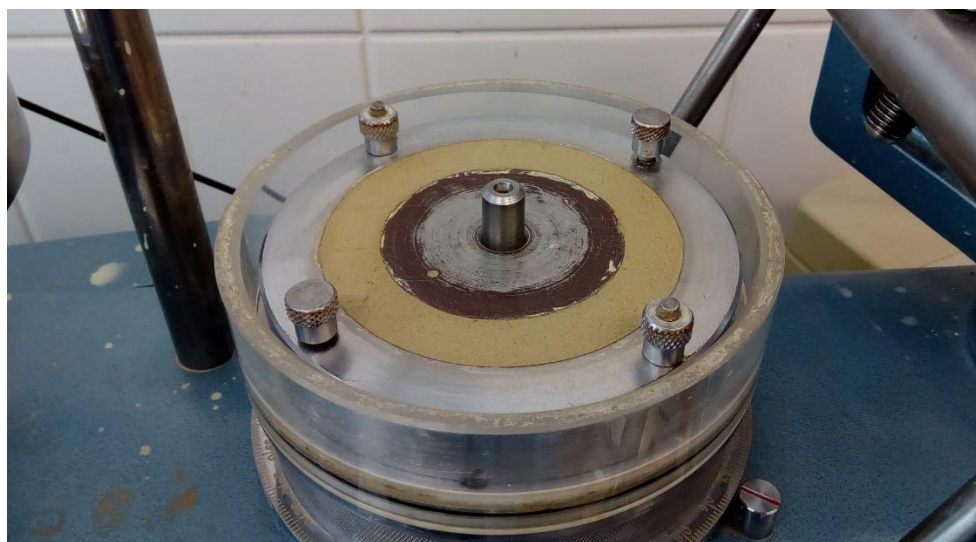
4.3.3 Kalibrace dynamometrů

Před každou druhou zkouškou (zkouška při jednom obsahu jílové frakce pro všechna měřená normálová napětí) jsem provedla kalibraci dynamometrů, měřících velikost smykových sil. Dynamometry jsem postupně vyjmula z přístroje, postavila na pevnou podstavu nebo na kalibrační stojan, vynulovala hodinky měřící stlačení prstence a na vrchní destičku položila 4 kg závaží po 0,5 kg. Po každém přiložení jsem zaznamenala hodnotu stlačení dynamometru. Na základě kalibrační přímky, proložené naměřenými hodnotami, bylo později možné přepočítat měřená stlačení na hodnoty smykových sil.

4.3.4 Smykové zkoušky

Všechny zkoušené materiály kromě písku, byly při aplikaci do vzorkového prostoru v podobě pasty o vlhkosti 1-1,5násobku w_L . Pomocí rovného nože se zaoblenou špičkou

jsem pastou vyplnila vzorkový prostor tak, abych zabránila vzniku vzduchových kapes a vzorek zarovnála s jeho okrajem (příkladem je Obr. 4.10). Písek jsem do vzorkového prostoru pouze nasypala a rovněž zarovnála s okrajem. Vzorkový kontejner jsem vsadila do přístroje a zatížila horní destičkou. Na destičku jsem umístila pákový mechanismus, spustila hodinky měřící změnu výšky vzorku a plexisklovou nádržku naplnila destilovanou vodou, aby byl v průběhu celé zkoušky vzorek saturovaný. Přes pákový mechanismus jsem postupně zvyšovala normálové napětí tak, aby pozvolna disipovaly pórové tlaky a vzorek se ze vzorkového prostoru nevytlačil. Když jsem dosáhla požadované hodnoty normálového napětí a změna výšky vzorku se zastavila, nastavila jsem dynamometry k ramenům horní destičky tak, aby úhel, který s rameny při vzájemném kontaktu svíraly, byl 90° . Dynamometry jsem zaaretovala. Úchylkoměry měřící jejich stlačení jsem zapnula a mírně pootočila rotační deskou tak, aby se s nimi ramena dostala do lehkého kontaktu. Pomocí ozubených koleček a převodovky jsem nastavila rychlost smyku na 0,8 nebo 0,16 %/min a zpustila jsem čtení dat a smyk. Smyk jsem ve většině případů ukončila po dosažení hodnoty posunu blízké 100 mm. Pokud jsem ho ukončila dříve, bylo to z důvodu chyby mého úsudku, způsobené začátečnickou nezkušeností s obsluhou přístroje. Toto se týká především směsi s 60 % jílové frakce. U zbylých zkoušek nebyl posun kratší než 50 mm.



Obr. 4.10: Vzorek se 75 % jílové frakce před smykem.

Rotační smykové zkoušky jsem prováděla metodou *Multistage test procedure* (MTP), jak ji popisuje Najser (2004). Po prvním smyku jsem vzorek z přístroje nevyjmula, ale vypnula měření dynamometrů, které jsem odaretovala, aby nebránily konsolidaci při následném zatížení na vyšší stupeň normálového napětí. Po konsolidaci jsem opět dynamometry nastavila podle výše uvedeného postupu a spustila smyk. Toto jsem provedla

postupně pro hodnoty normálového napětí 30, 50, 70 a u všech směsí a jílové frakce i 150 kPa.

Po ukončení smyku posledního stupně normálového napětí jsem z plexisklové nádržky odsála vodu. Uvolnila jsem šrouby připevňující vzorkový kontejner k otočné desce a vyjmula ho z přístroje. Horní destičku jsem sejmula a pořídila fotografii smykové plochy vzorku (příklad Obr. 4.11).



Obr. 4.11: Smyková plocha vzorku se 60 % jílové frakce.

Abych ověřila absenci reziduální pevnosti přimíchávaného materiálu, provedla jsem rotační smykovou zkoušku i na střelečském písku. Pro získání druhé krajní hodnoty jsem poté provedla smykovou zkoušku na čisté jílové frakci. Zvolila jsem však příliš vysokou vlhkost pro umístění vzorku do vzorkového prostoru (2násobek w_L), tudíž se jeho velká část včetně pórové vody při konsolidaci a následném smyku vytlačila. Výška vzorku se snížila natolik, že přestala být reprezentativní. Tuto zkoušku jsem vzala v úvahu pouze jako orientační a nevyhodnocovala ji.

Podle Skemptonova (1985) předpokladu jsem očekávala přechod z kritické pevnosti na reziduální v rozmezí 20 až 50 % jílové frakce. Z tohoto důvodu, a také pro nedostatek materiálu, jsem pro první smykovou zkoušku směsi zvolila obsah jílové frakce 60 %. Dále jsem zkoušela směsi při 50 a 20 % jílové frakce. Měřené hodnoty reziduální pevnosti byly výrazně vyšší, než jsem pro dané obsahy jílové frakce očekávala. Proto jsem další smykové zkoušky provedla na směsích s 75 a 35 % jílové frakce a doplnila tak přechod mezi krajními pevnostmi.

Zkoušky na původním neodseparovaném vzorku zeminy provedl v rámci své práce Mgr. Jakub Roháč (PhD. student). Naměřená data při 30, 50 a 70 kPa jsem pouze vyhodnotila.

Pro ověření správnosti chodu rotačního smykového přístroje provedl Mgr. Tomáš Mohyla (Ph.D. student PřF UK) totožným postupem smykovou zkoušku na čistém, převážně prachovitém kaolinu (obsah jílové frakce menší než 20 %) a jeho směsi se 40 % střelečského písku.

4.4 Vyhodnocení

Vyhodnocení rotačních smykových zkoušek jsem provedla v programu MS Excel. Naměřená data jsem vložila do souboru, pomocí kalibrace přepočítala měřená stlačení dynamometrů (mm) na smykové síly (N). Z těchto sil jsem pomocí vzorce (3) uvedeného v návodu přístroje (Wykeham Farrance International, 2000), kde F_1 a F_2 jsou smykové síly, L je vzdálenost mezi body kontaktů dynamometrů s rameny horní destičky a R_1 a R_2 jsou vnitřní a vnější průměry mezikruží, spočetla smykové napětí τ (kPa). Podle použité rychlosti a kroku měření jsem vypočítala posun, který jsem vynesla do grafu proti smykovému napětí. Hodnoty smykového napětí zkoušek, které obsahovaly písek byl rozkolísané, proto jsem spočítala také klouzavé průměry smykového napětí z intervalu hodnot, který zhruba odpovídal čtení po 3 minutách. Klouzavé průměry jsem rovněž vykreslila do grafu proti posunu. Z výsledných křivek jsem v místě lokálního minima v relativně ustálené části odečetla hodnoty velikost smykového napětí. Tento postup jsem provedla pro všechna normálová napětí σ měřená na daném vzorku. Body v závislosti $\tau:\sigma$ jsem proložila regresní přímkou jdoucí do nuly. Ze směrnice přímky jsem spočetla výsledný úhel vnitřního tření v reziduálním stavu.

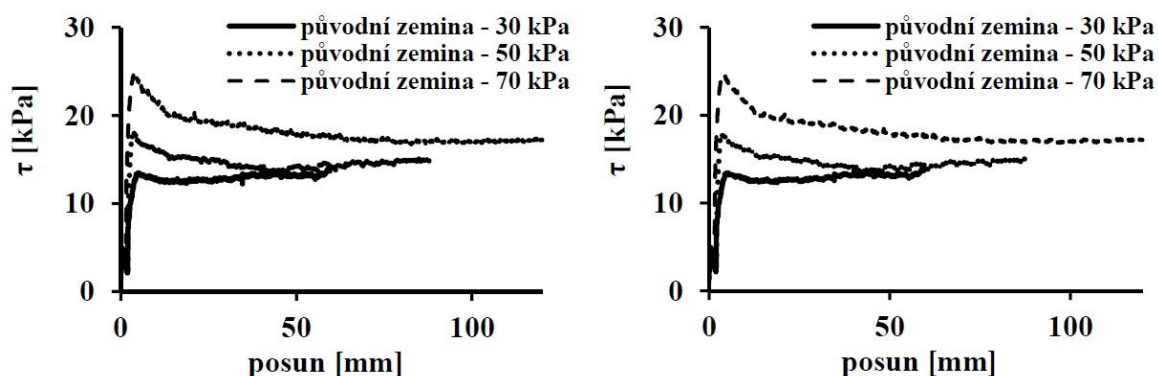
$$\tau = \frac{3(F_1 + F_2)L}{4\pi(R_2^3 - R_1^3)}, \quad (3)$$

Výsledné hodnoty úhlu vnitřního tření pro jednotlivé vzorky jsem vynesla do grafu v závislosti na obsahu jílové frakce. Do grafu jsem rovněž umístila hranice hodnot, pro vztah reziduální pevnosti k obsahu jílové frakce, stanovené Skemptonem (1964, 1985).

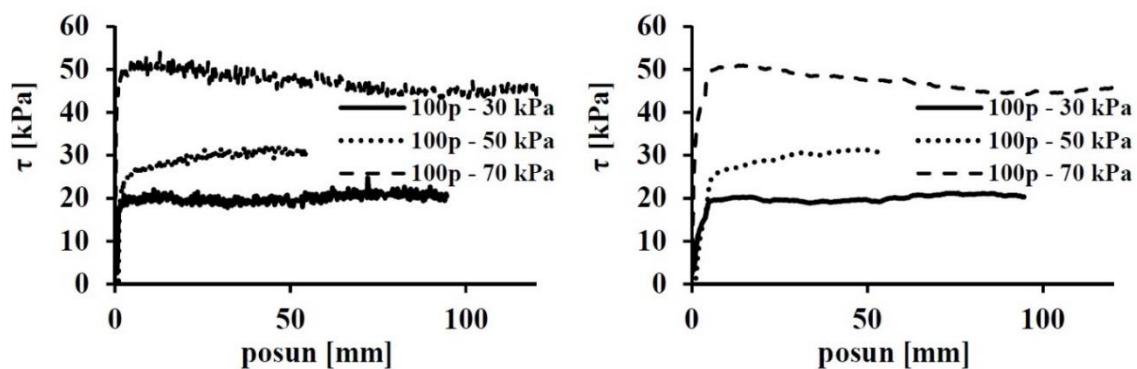
4.5 Výsledky

Díličními výsledky mé výzkumné práce jsou grafy závislosti smykového napětí na posunu a na normálovém napětí (Obr. 4.12 až Obr. 4.19). V křivkách smykového napětí závislého na posunu pro směsi obsahující střelečský písek jsou hodnoty smykových napětí značně rozkolísané (viz kapitola 4.6 Diskuse). Klouzavý průměr toto rozkolísání částečně

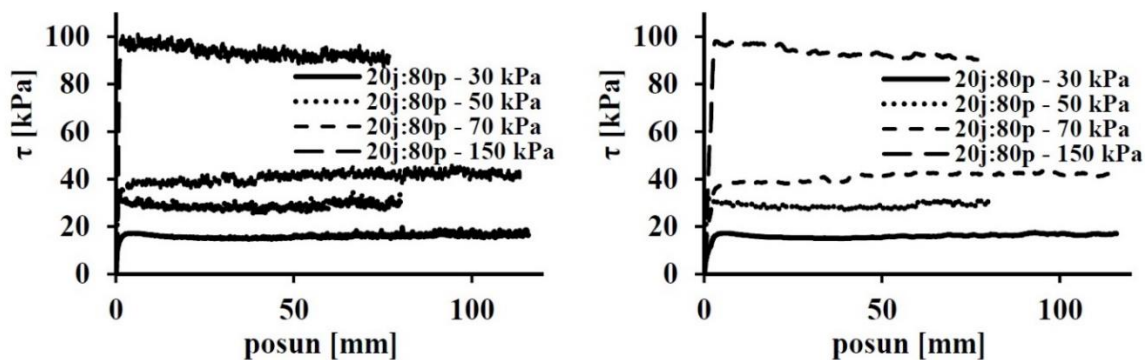
vyhladil. Ve většině případů také mírně zvýšil hodnotu úhlu vnitřního tření v reziduálním stavu, přestože byly hodnoty z křivky odečítány v totožných úsecích.



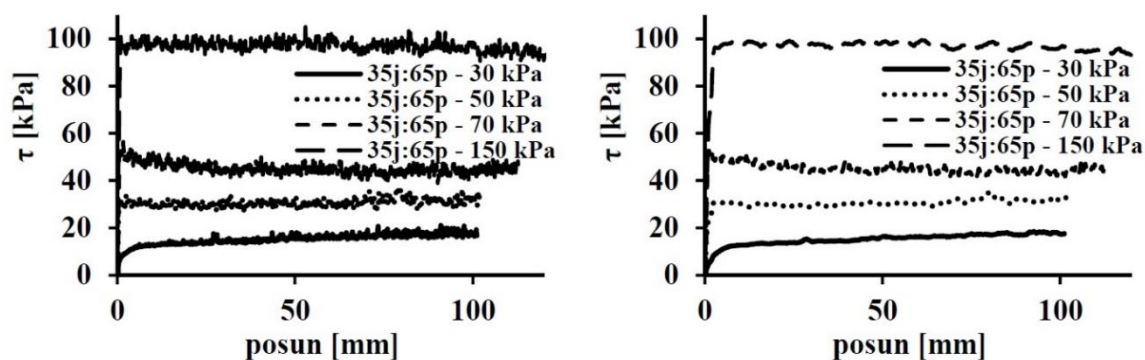
Obr. 4.12: Závislost smykového napětí na posunu původní zeminy pro různá normálová napětí (data Mgr. Jakub Roháč). Původní data vlevo, klouzavé průměry vpravo.



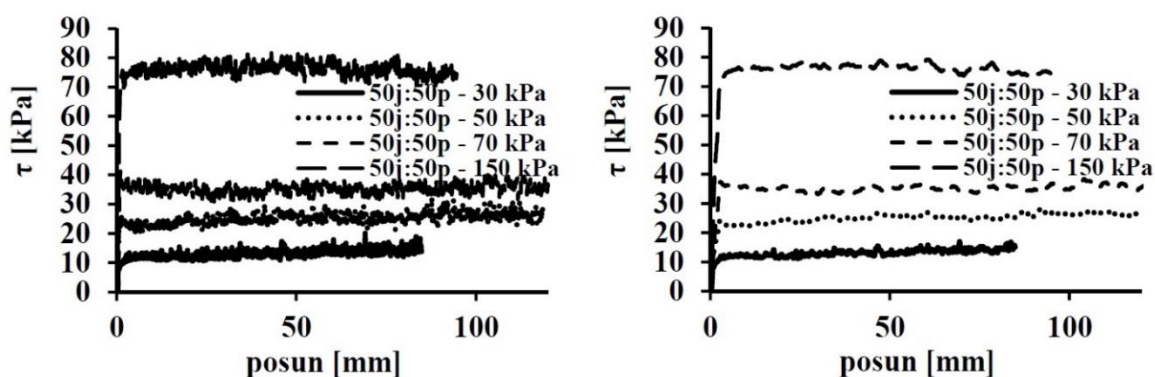
Obr. 4.13: Závislost smykového napětí na posunu čistého písku pro různá normálová napětí. Původní data vlevo, klouzavé průměry vpravo.



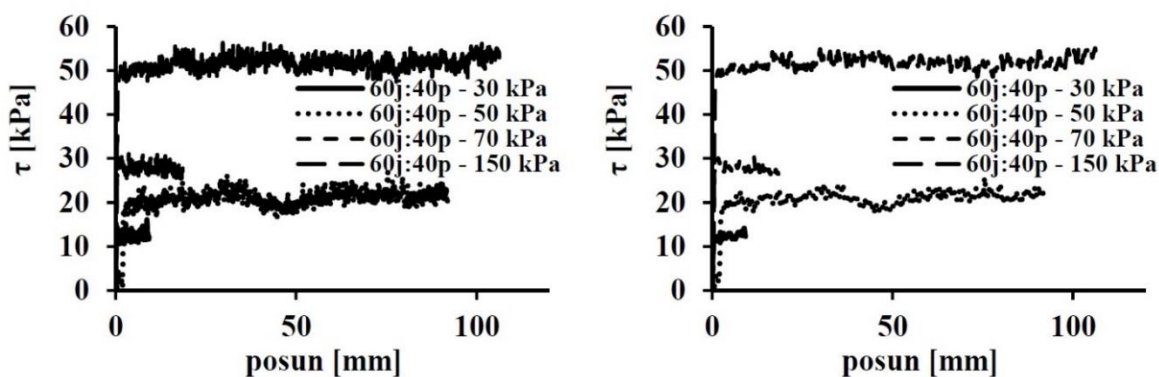
Obr. 4.14: Závislost smykového napětí na posunu směsi s 20 % jílové frakce pro různá normálová napětí. Původní data vlevo, klouzavé průměry vpravo.



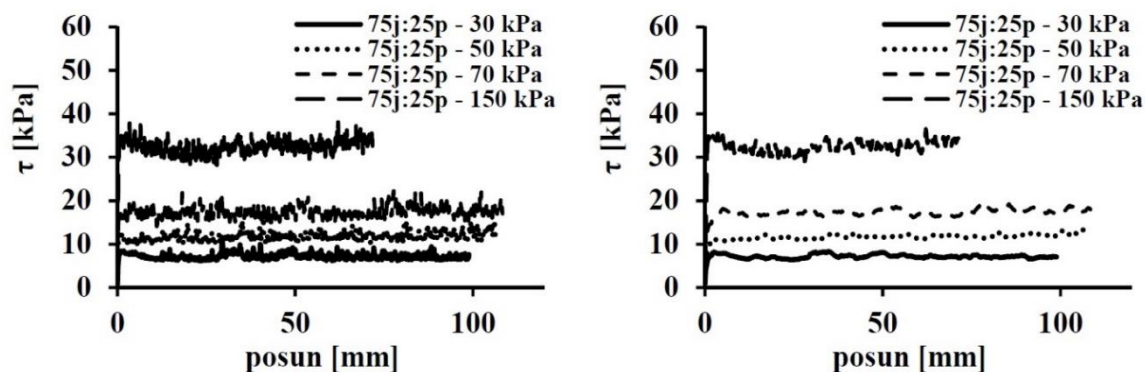
Obr. 4.15: Závislost smykového napětí na posunu směsi s 35 % jílové frakce pro různá normálová napětí. Původní data vlevo, klouzavé průměry vpravo.



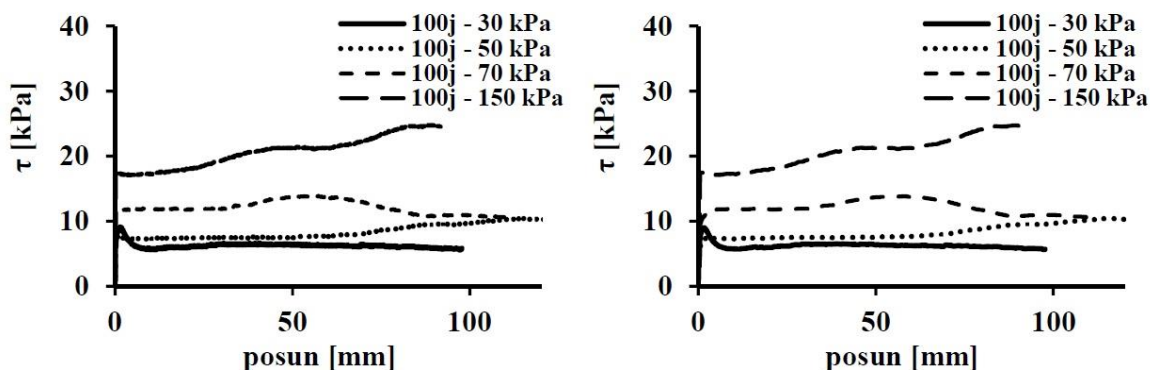
Obr. 4.16: Závislost smykového napětí na posunu směsi s 50 % jílové frakce pro různá normálová napětí. Původní data vlevo, klouzavé průměry vpravo.



Obr. 4.17: Závislost smykového napětí na posunu směsi s 60 % jílové frakce pro různá normálová napětí. Původní data vlevo, klouzavé průměry vpravo.

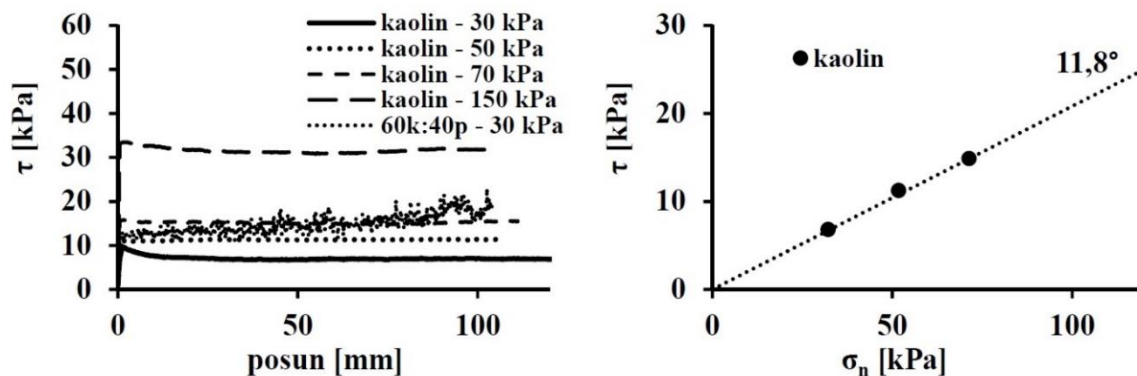


Obr. 4.18: Závislost smykového napětí na posunu směsi s 75 % jílové frakce pro různá normálová napětí. Původní data vlevo, klouzavé průměry vpravo.



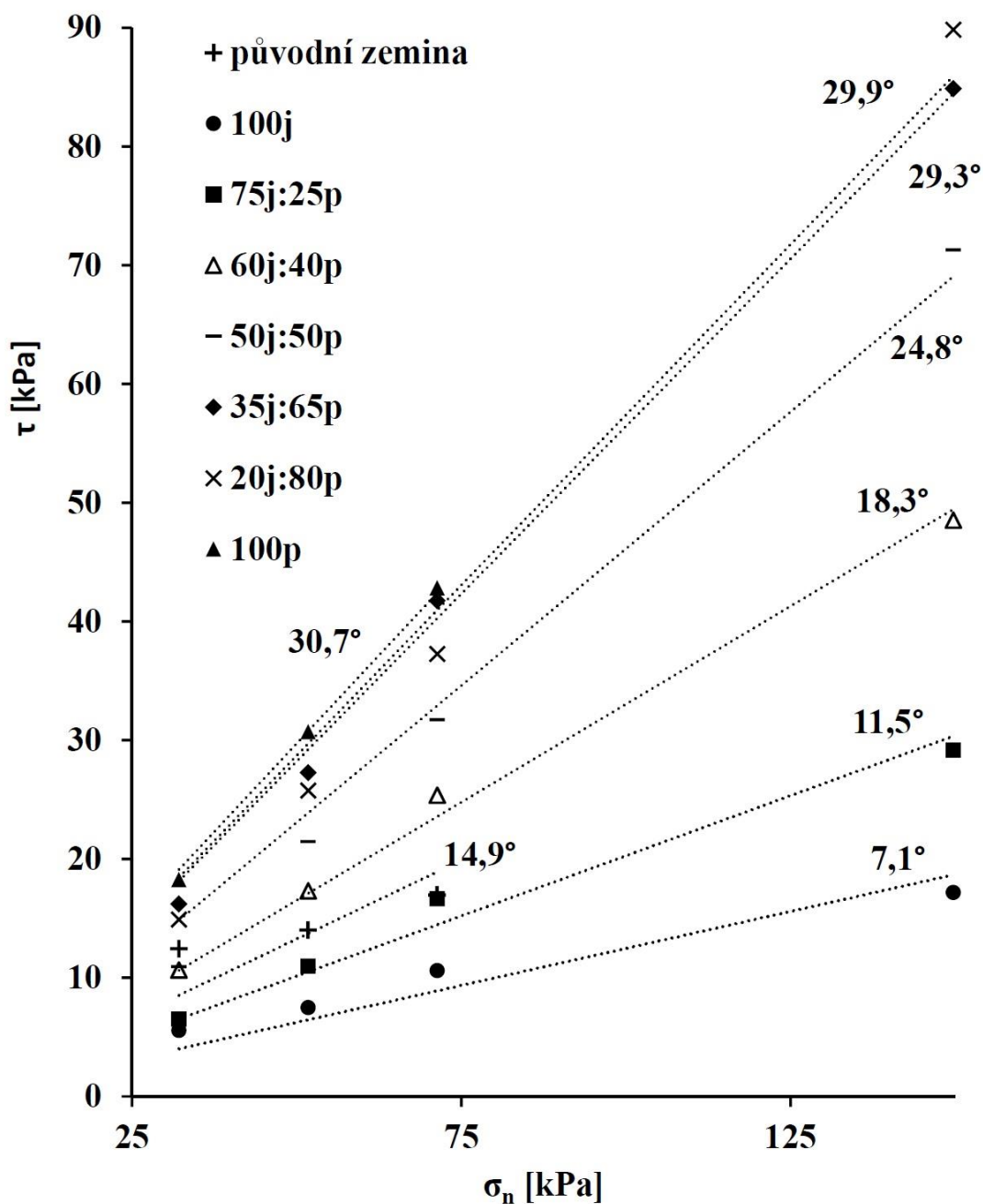
Obr. 4.19: Závislost smykového napětí na posunu 100 % jílové frakce pro různá normálová napětí. Původní data vlevo, klouzavé průměry vpravo.

Obdobné rozkolísání se objevilo i u smykových zkoušek kaolinu se 40 % střelečského písku provedených Mgr. Tomášem Mohylou. Křivka čistého kaolinu byla ustálená, bez známky kolísání (Obr. 4.20).

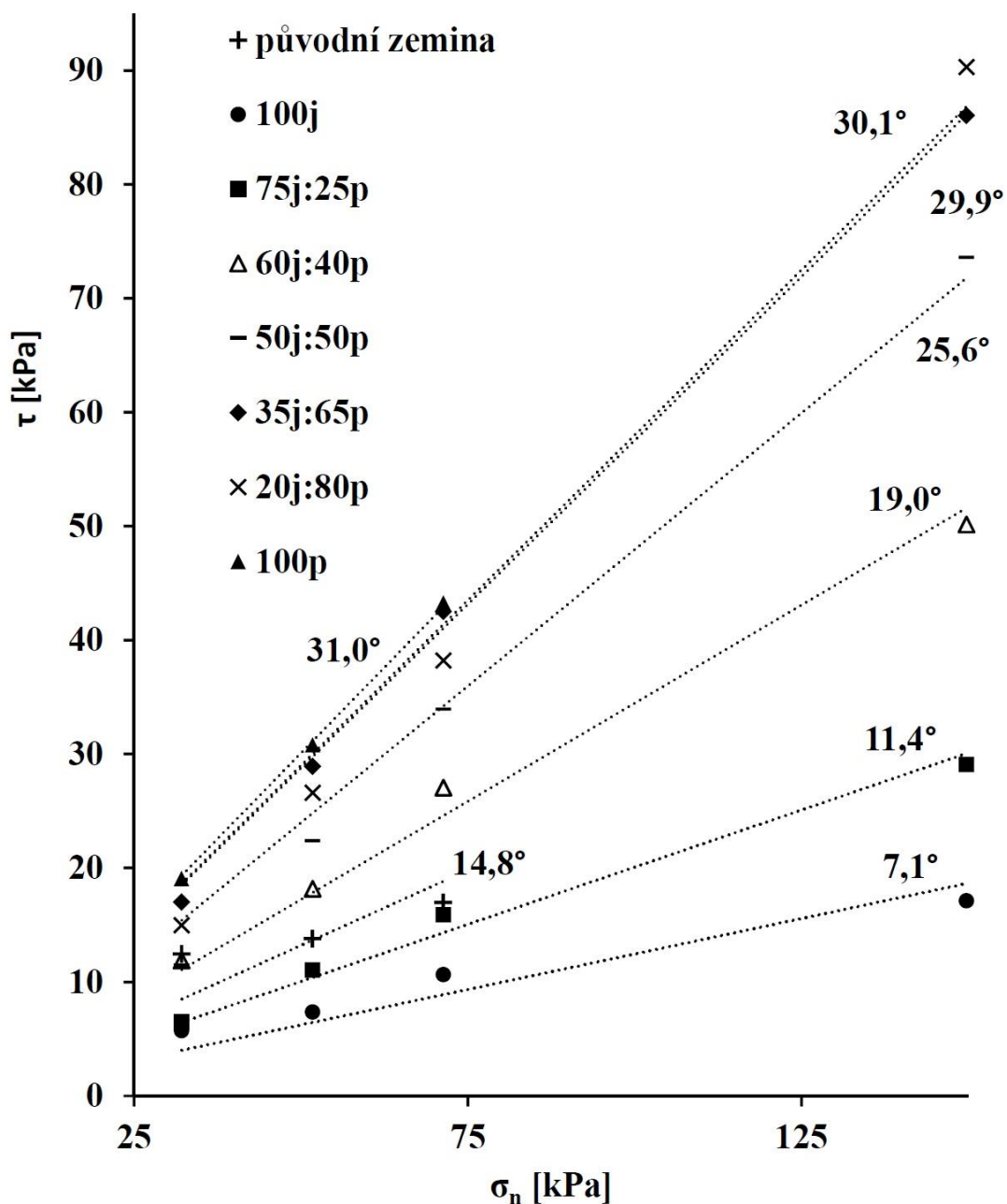


Obr. 4.20: Závislost smykového napětí na posunu čistého kaolinu pro různá normálová a směsi 60 % kaolinu a 40 % střelečského písku pro normálové napětí 30 kPa (vlevo). Závislost velikosti smykového napětí čistého kaolinu na velikosti normálového napětí, včetně reziduálního úhlu vnitřního tření (vpravo) (data Mgr. Tomáš Mohyla).

Smykové zkoušky jsem provedla pro tři až čtyři různá normálová napětí na jednom vzorku. Proložení přímkou větším množstvím naměřených bodů (Obr. 4.21 a Obr. 4.22) se snížil vliv odlehlejších hodnot a díky tomu se snížila chyba měření. Relativně nízká napětí (30, 50 a 70 kPa) jsem použila kvůli rychlejší konsolidaci a menší ztrátě vzorku vytlačáním, ke kterému u dané konstrukce přístroje dochází. Napětí 150 kPa jsem zvolila pro ověření relevance použití nižších napětí, která mohou do měření vnášet větší chyby. Výsledky zkoušek při nižších napětích ve většině případů odpovídaly výsledkům při napětích vyšších.

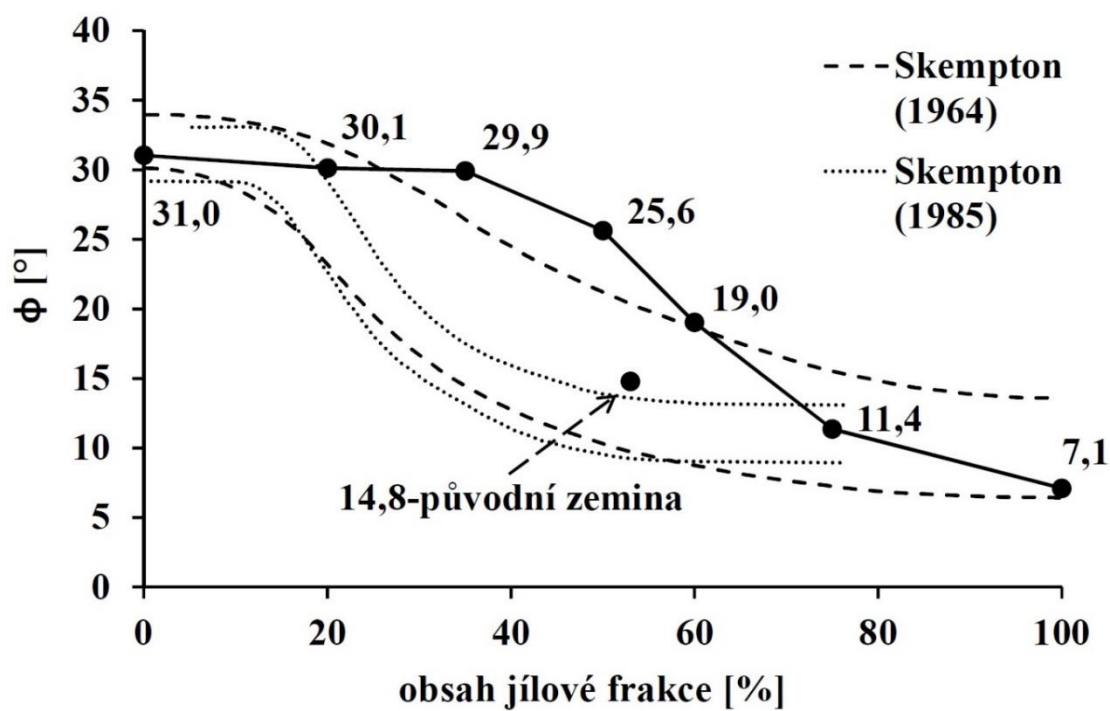
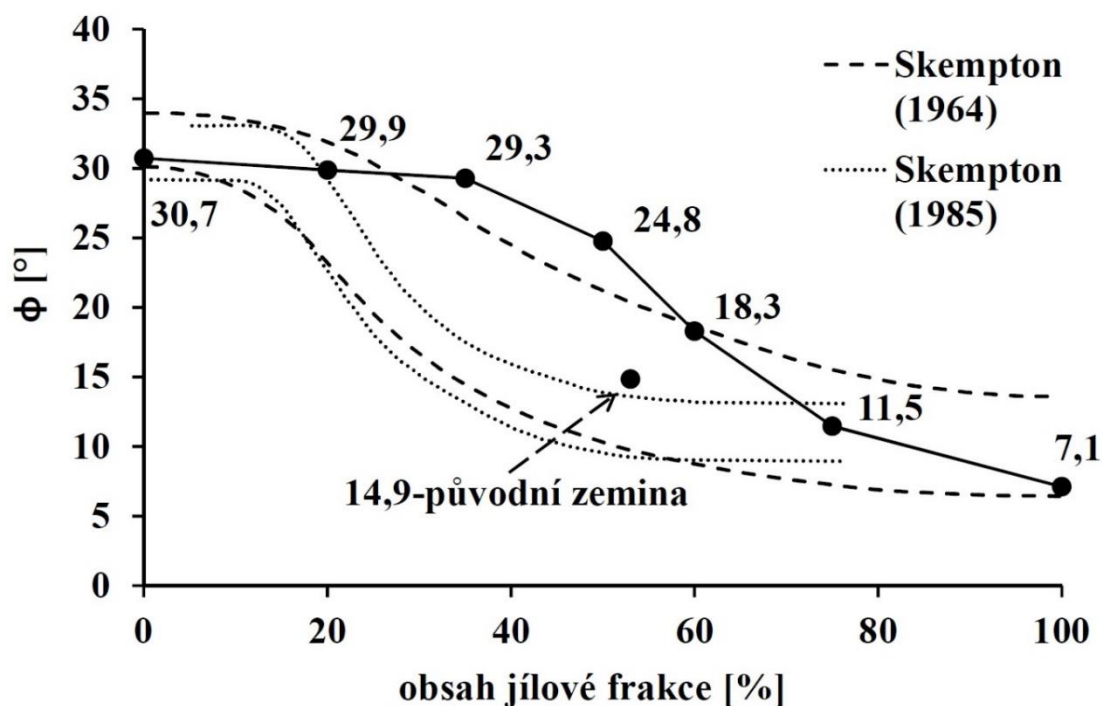


Obr. 4.21: Závislost velikosti smykového napětí na normálovém napětí všech zkoušených zemin, včetně reziduálních úhlů vnitřního tření (původní data).



Obr. 4.22: Závislost velikosti smykového napětí na normálovém napětí všech zkoušených zemin, včetně reziduálních úhlů vnitřního tření (klouzavé průměry).

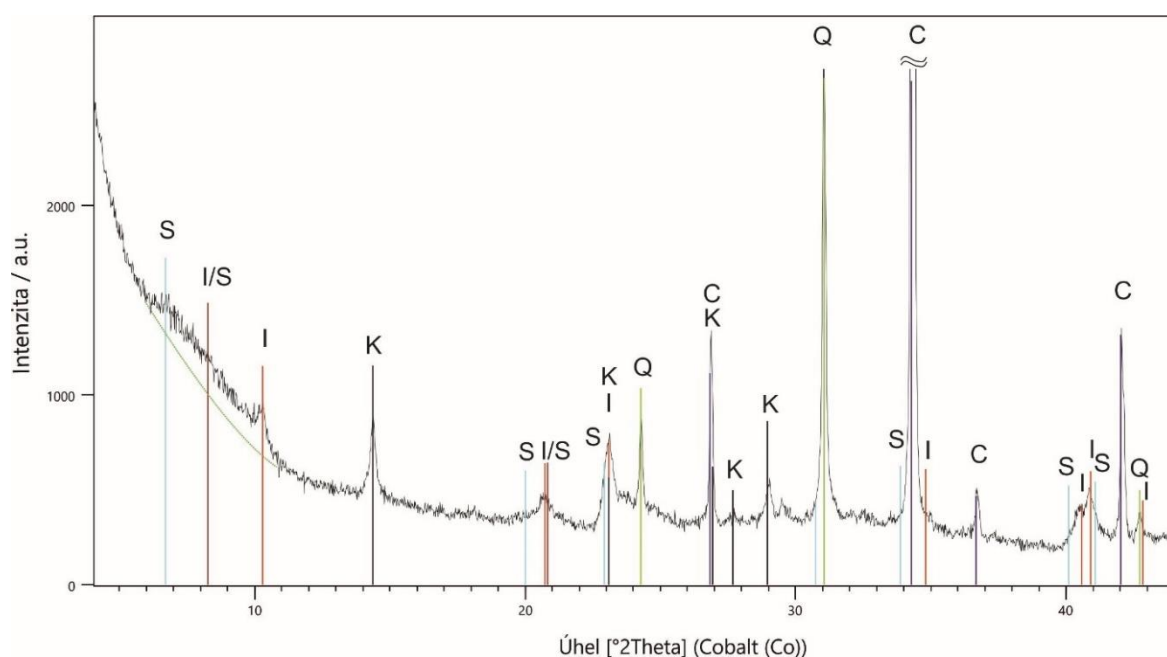
Hlavním výsledkem mé laboratorní práce je graf závislosti úhlu vnitřního tření na obsahu jílové frakce (Obr. 4.23 nahoře). Graf, ve kterém je použitý klouzavý průměr smykového napětí, se výrazně neliší (Obr. 4.23 dole). Na obou je vidět pokles reziduální pevnosti s narůstajícím obsahem jílové frakce.



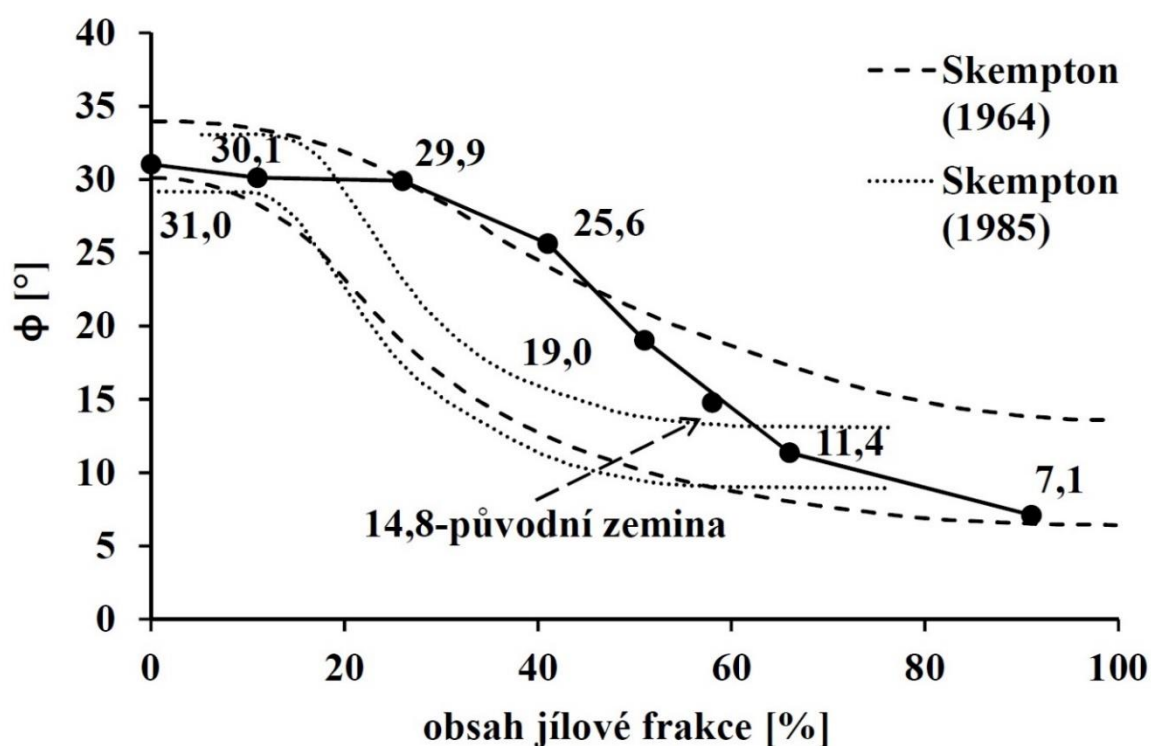
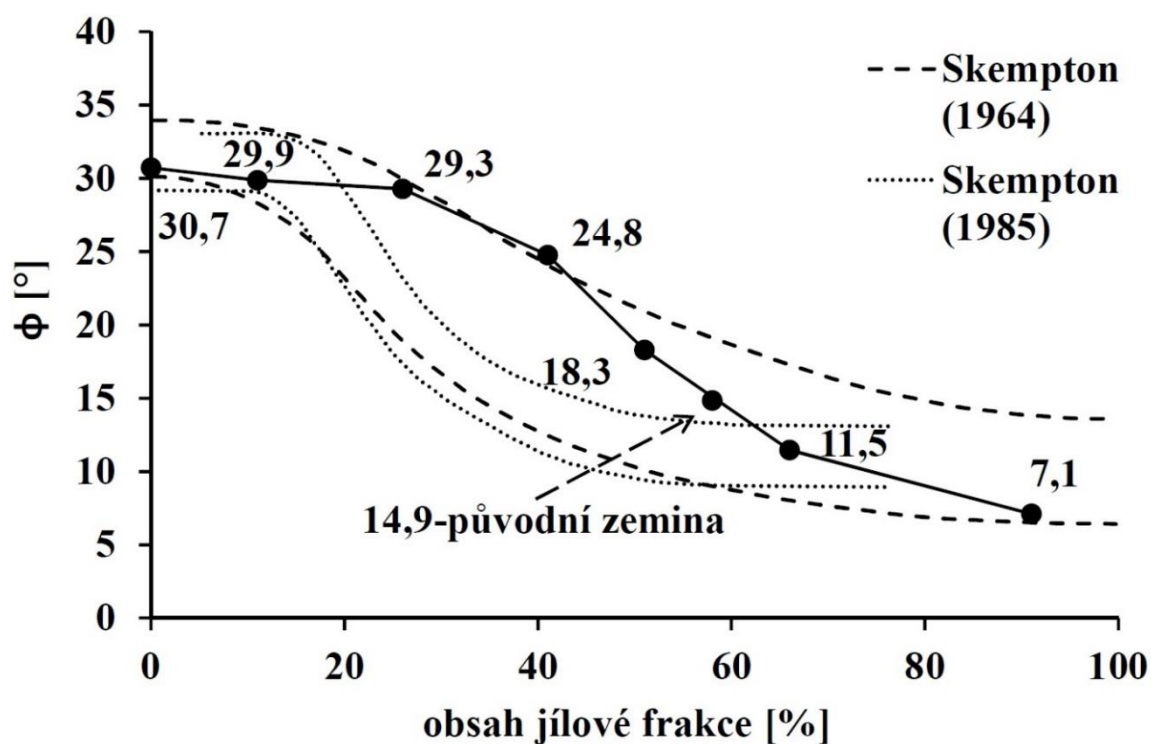
Obr. 4.23: Závislost úhlu vnitřního tření na obsahu jílové frakce. Nahoře závislost pro původní data, dole pro klouzavé průměry. Plná čára spojuje naměřené body. Čárkovanou čarou jsou vyznačeny hranice určené Skemptonem (1964) pro vztah úhlu vnitřního tření a jílové frakce. Tečkovanou čarou jsou obdobné hranice, stanovil Skempton (1985).

Přechod z pevnosti písku na pevnost jílu je však značně posunutý vůči původnímu předpokladu. Místo abychom pozorovali začátek poklesu pevnosti při obsahu jílové frakce 25 %, jak tvrdí Skempton (1985), pozorujeme ho až okolo 40-45 %. Také v případě

vysokých obsahů jílové frakce, kde by od 50 % měla podle Skempton (1985) být hodnota reziduální pevnosti ustálená, není náznak ustálení příliš patrný. Z těchto důvodů jsem požádala o provedení rentgenové difrakce vzorku odseparované jílové frakce RNDr. Davida Hradila, Ph.D. z Ústavu anorganické chemie AV ČR (Obr. 4.24). Kvůli malému množství vzorku, které jsem k tomuto účelu mohla poskytnout, přítomnosti jak izometrických, tak přednostně orientovaných krystalů a také různé krystalinitě minerálů, nebylo možné stanovit obsahy přítomných minerálů s velkou přesností. I s tímto omezením difrakce odhalila přítomnost minimálně 50 % trojrozměrných minerálů (kalcit a křemen) a maximálně 50 % jílových minerálů (kaolinit, illit a smíšená struktura illit-smektit) (RNDr. David Hradil, Ph.D., ústní sdělení a emailová korespondence, květen 2018). Dále byla firmou ARCADIS CZ, a.s. provedena zrnitostní analýza separovaného vzorku a přírodního vzorku, který byl před jejím provedením míchán stejným způsobem jako při přípravě k separaci. Výsledky ukázaly, že míchání přírodního vzorku zvýšilo měřený obsah jílové frakce o 5 % (58 %) a že separací (kapitola 4.3.1) jsem nezískala 100 % jílovou frakci, ale že připravený vzorek obsahoval pouze 91 % jílové frakce.



Obr. 4.24: Část difraktogramu s charakteristickými difrakčními liniemi kalcitu (C), křemene (Q), kaolinitu (K), illitu (I) a expandabilních jílových struktur (pravděpodobně smektitu (S) a illit/smektitu (I/S)). Zelená linie určuje průběh pozadí při nízkých úhlech tak, aby byla dobře čitelná široká difúzní difrakce smíšených struktur. Odhadovaný podíl kalcitu je alespoň 40 %. Měřeno na difraktometru PANalytical X'Pert PRO s CoKa rentgenkou na Ústavu anorganické chemie AV ČR, v. v. i. (Hradil, 2018; emailová korespondence).



Obr. 4.25: Závislost úhlu vnitřního tření na obsahu jílové frakce opravená o zrnitostní analýzy obdržené po provedení a vyhodnocení zkoušek. Nahoře závislost pro původní data, dole pro klouzavé průměry. Plná čára spojuje naměřené body. Čárkovanou čarou jsou vyznačeny hranice určené Skemptonem (1964) pro vztah úhlu vnitřního tření a jílové frakce. Tečkovanou čarou jsou obdobné hranice, stanovil Skempton (1985).

4.6 Diskuse

Kontrolní smykové zkoušky na kaolinu provedené Mgr. Tomášem Mohylou potvrdily správnost postupu měření i chodu smykového přístroje. Veškeré kolísání tedy bylo pravděpodobně způsobeno použitým materiálem.

Kolísání hodnot smykového napětí písku je vcelku běžné. Způsobuje ho zakliňování trojrozměrných zrn v prostorech mezi vzorkovým kontejnerem a horní destičkou přístroje. Pozvolné kolísání hodnot smykové pevnosti čisté jílové frakce mohly způsobit ztvrdlé šupinky jílu, které se vytvořily na povrchu vzorku, jenž byl v kontaktu s horní destičkou přístroje (Obr. 4.26). Šupinky se mohly na smykové ploše, či v prostoru mezi horní destičkou a vzorkovým kontejnerem vzpříčovat a zvyšovat tak smykovou pevnost. Při zkoušení směsí se tyto dva druhy kolísání (kolísání způsobené zakliňováním zrn písku a vzpříčováním destiček) spojily.



Obr. 4.26: Smyková plocha vzorku čisté jílové frakce.

Faktor kolísání značně zkomplikoval a snížil přesnost stanovení ustálené reziduální hodnoty smykového napětí. Pro určení vztahu reziduální pevnosti a obsahu jílové frakce, však toto není nepřekonatelnou překážkou, pokud reziduální pevnost určujeme pro všechny zkoušky stejným způsobem (v mém případě lokální minima smykového napětí či lokální minima jeho klouzavého průměru).

V rozkolísaných křivkách lze jen těžko posoudit, zda je relevantnější použití skutečných hodnot, či klouzavého průměru. U některých křivek je totiž patrný rozdíl mezi

lokální hodnotou smykového napětí a jeho lokálním zvýšením. V tomto případě klouzavý průměr hodnoty smykového napětí zkreslí (zvýší smykové napětí). U jiných křivek však z původních dat není hodnota smykového napětí jasně patrná. V tomto případě může klouzavý průměr interpretaci křivek usnadnit a zpřesnit.

Posunutí přechodu mezi kritickou pevností písku a reziduální pevností jílové frakce oproti očekávané hranici (přibližně 20-25 % jílové frakce) je, jak napovídají výsledky rentgenové difrakce a zrnitostních analýz, zapříčiněno relativně nízkým obsahem (maximálně 50 %) plochých jílových částic v odseparovaném vzorku.

Nižší obsah jílové frakce v přírodní zemině, stanovený první analýzou, byl způsobený nedostatečným rozmícháním vzorku před jejím provedením. Nízký obsah jílových minerálů v jílové frakci mohl být již v přírodním vzorku nebo ho mohla částečně způsobit koagulace jílových minerálů ze suspenze při separaci, která způsobila pokles shluků jílových zrn, jež klesly pod vypočítanou hladinu, zatímco drobný kalcit a křemen zůstali ve vznosu. Mohl ho také způsobit následný postup vysoušení vzorku.

Způsob stanovení zrnitost přirozeného vzorku (koagulace, nedokonalé rozmíchání před stanovováním) a možná i postup separace způsobil rozdíl mezi polohou bodu přirozené zeminy a polohou zjištěné křivky v grafu závislosti úhlu vnitřního na obsahu jílové frakce, pro stejnou hodnotu úhlu. Při přepočtu na správné, nově zjištěné hodnoty obsahů jílové frakce, se křivka dostala do hranic předpokládaných hodnot stanovených Skemptonem (1964).

5. Závěr

Ke vzniku reziduální pevnosti přispívají pouze plochá, převážně jílová zrna, která jsou působením smykových sil uspořádána paralelně se směrem jejich působení. Díky tomu dochází ke skluzu mezi jednotlivými plochami zrn a tím ke snížení pevnosti. Velikost reziduální pevnosti se tedy v první řadě odvíjí od tvaru (mineralogie) zrn. Aby uspořádáním zrn došlo k vytvoření smykové plochy, je třeba určitého procentuálního zastoupení plochých zrn v zemině. Proto hodnota reziduální pevnosti závisí také na obsaženém množství těchto plochých zrn. Toto množství bývá definováno pomocí obsahu jílové frakce, což je obsah částic menších než 2 μm .

Skempton (1985) udává vliv obsahu jílové frakce na reziduální pevnost následující:

Je-li obsah jílové frakce nižší než 20 %, mají jílové minerály na pevnost pouze malý vliv. Ta je pak řízena převážně zrny písku a prachu. Pokud však obsah jílové frakce překročí 50 %, je pevnost jílovými zrny ovlivňována téměř výhradně a závisí tedy na jejich typu a charakteru. (převzato, upraveno; Skempton (1985))

Hodnota reziduální pevnosti se tedy podle Skempton (1985) od 20 % obsahu jílové frakce snižuje až do ustálení na hodnotě, která je dosažena při 50 % jílové frakce a při dalším zvyšování obsahu se nemění. Toto tvrzení všeobecně platí, pokud je obsah jílové frakce roven obsahu plochých jílových minerálů.

Křivka závislosti reziduální pevnosti na obsahu jílové frakce mívá (jak potvrzují výsledky většiny autorů) v zásadě shodný tvar pro všechny jemnozrnné zeminy. Její poloha a rozsahy hodnot reziduální pevnosti se však mohou výrazně lišit. Je to způsobeno tím, že jílová frakce (jak potvrdila rentgenová difrakce) v drtivé většině případů neobsahuje pouze jílové minerály. Mimo to, všechny jílové minerály nemají plochý tvar. Proto je použití jílové frakce pro odhad hodnot reziduální pevnosti nepřesné.

Pokud však přesto chceme pro odhad reziduální pevnosti využít znalost obsahu jílové frakce, je třeba znát mineralogické složení, abychom věděli, jaké množství minerálů ke snižování hodnoty reziduální pevnosti přispívá a jakým způsobem. To je však komplikované a nelze to se stoprocentní přesností určit. Abychom byli schopni správně odhadnout velikost reziduální pevnosti z obsahu jílové frakce bez znalosti mineralogického složení, museli bychom mít zeminu se známou závislostí těchto dvou proměnných.

Nejúčinnějším a nejpresnějším způsobem určení velikosti reziduální pevnosti je provedení laboratorní smykové zkoušky, nejlépe v rotačním smykovém přístroji. Druhou, méně přesnou možností, je zkombinování parametrů odrážejících jak obsah, tak druh jílových minerálů. To je možné pomocí poměru indexu plasticity PI a obsahu jílové frakce CF, který užívá Skempton (1985).

Výsledky, které jsem po úpravě obdržela ze série provedených zkoušek na jílové frakci vzorku z lokality Dobkovičky, střelečském písku a jejich směsích, potvrzují pokles reziduální pevnosti se vzrůstajícím obsahem jílové frakce, který zjistila již řada autorů přede mnou. Z výsledků je dále zřejmé, že mineralogické složení zeminy je určujícím faktorem pro velikost reziduální pevnosti. Odhadování hodnoty reziduální pevnosti pouze na základě obsahu jílové frakce, bez znalosti dalších proměnných, je proto nedostatečné.

6. Literatura

Atkinson, J. H. (2007). The mechanics of soils and foundations. Taylor & Francis, 2nd ed., 442 stran.

Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K., Andresen, A. & Brown, J. D. (1971). A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength. *Géotechnique* 21, No. 4, 273-328.

Borovec, Z. (1992). Metody laboratorního výzkumu hornin a minerálů. Skriptum, Univerzita Karlova, vydavatelství Karolinum, 1. vydání, Praha.

Bromhead, E. N. (1979). A simple ring shear apparatus. *Ground Engng.* 12, 40-44.

Bromhead, E. N. (2005). The Stability of slopes. Taylor & Francis, 2nd ed., ISBN 0-419-25580-X, 411 stran.

Feda, J. (1977). Základy mechaniky partikulárních látek. Academia, 1. vydání, Praha, 347 stran.

Haefeli, E. (1938). Mechanische Eigenschaften von Lockergestein. Schweiz. Bauzg 111, 299-303, 321-325. In: *Lupini, J. F., Skinner, A. E. & Vaughan, P. R. (1981). The drained residual Strength of cohesive soils. Géotechnique* 31, No. 2, 181-213.

Hawkins, A. B., Privett, K. D. (1985). Measurement and use of residual shear strength of cohesive soils. *Ground Engineering*, Vol. 18, No. 8, 22-28.

Hradil, D. (květen 2018). Ústní sdělení a emailová korespondence, týkající se rentgenové difrakce separovaného vzorku. Ústav anorganické chemie AV ČR, v. v. i.

Hvorslev, M. J. (1936). A ring shearing apparatus for the determination of the shearing resistance and plastic flow of soils. *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech.*, Boston 2, 125-129. In: *Lupini, J. F., Skinner, A. E. & Vaughan, P. R. (1981). The drained residual Strength of cohesive soils. Géotechnique* 31, No. 2, 181-213.

Hvorslev, M. J. (1937). Über die Festigkeitseigenschaften gestörte bindiger Böden. *Ingeniørvidenskabelige skrifter*, A (45), København, 159 stran.

Hvorslev, M. J. (1939). Torsion shear tests and their place in the determination of the shearing resistance of soils. *Proc. Am. Soc. Test. Mater.* 39, 999-1022. In: *Lupini, J. F.*,

Skinner, A. E. & Vaughan, P. R. (1981). The drained residual Strength of cohesive soils. Géotechnique 31, No. 2, 181-213.

Chandler, R. J. (1966). The measurement of residual strength in triaxial compression. *Géotechnique 16, No. 3, 181-186.*

Kenney, T. C. (1967). The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils. *Proceedings of Geotechnical Conference, Oslo 1, 123-129.*

Lupini, J. F., Skinner, A. E. & Vaughan, P. R. (1981). The drained residual Strength of cohesive soils. *Géotechnique 31, No. 2, 181-213.*

Lupini, J. F. (1981). The residual strength of soils. Ph.D. thesis, University of London, 462 stran.

Mesri, G. & Capeda-Diaz, A. F. (1986). Residual strength of clays and shales. *Géotechnique 36, 269-274.*

Najser J. (2004). Použití rotačního smykového přístroje a reziduální pevnost zemin. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 68 stran.

Němečková, J. (2018). Protocol of laboratory results No.: 1711/15. 15.3.2018, SG Geotechnika, a. s.

Parathiras, A. N. (1994). Displacement rate effects on the residual strength of soils. Ph.D. thesis, Imperial College, University of London, 353 stran.

Plšková, M., Záruba, J., Starý, J. (leden 2016). Předběžná zpráva, D8 805 Lovosice – Řehlovice, II. etapa inženýrsko-geologického doprůzkumu v oblasti sesuvu Dobkovičky a v jeho předpolí v km 56.300-56.500. 73 stran.

Skempton, A. W. (1964). Long-term stability of clay slopes. *Géotechnique 14, No. 2, 77-102.*

Skempton, A.W. (1977) Slope Stability of Cuttings in Brown London Clay. *Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech., Tokyo, 1977, 3, 261-270*

Skempton, A. W. (1985). Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Géotechnique 35, No. 1, 3-18.*

Stark, T. D. & Eid, H. T. (1994). Drained residual strength of cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 5, 856-871.*

Tiedemann, B. (1937). Über die Schubfestigkeit bindiger Böden. Bautechnik 15, Nos 30 and 33, 400-403 and 433-435. In: *Lupini, J. F., Skinner, A. E. & Vaughan, P. R. (1981). The drained residual Strength of cohesive soils. Géotechnique 31, No. 2, 181-213.*

Tiwari, B. & Marui, H. (2005). A new method for the correlation of residual shear strength of the soil with mineralogical composition. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 9, 1139-1150.

Vít, L. (12.6.2014). FOTO: Vrtulník zmapoval sesuv u dálnice D8. www.ustecky.denik.cz, 20. 5. 2018.

Wykeham Farrance International Limited (2000). WF25850 Bromhead Ring Shear. Issue No. 1, Slough, England.

Xu, Ch., Wang, X., Lu, X., Dai, F., Jiao, S. (2018). Experimental study of residual strength and the index of shear strength characteristics of clay soil. Engineering Geology, Vol. 233, 183-190.